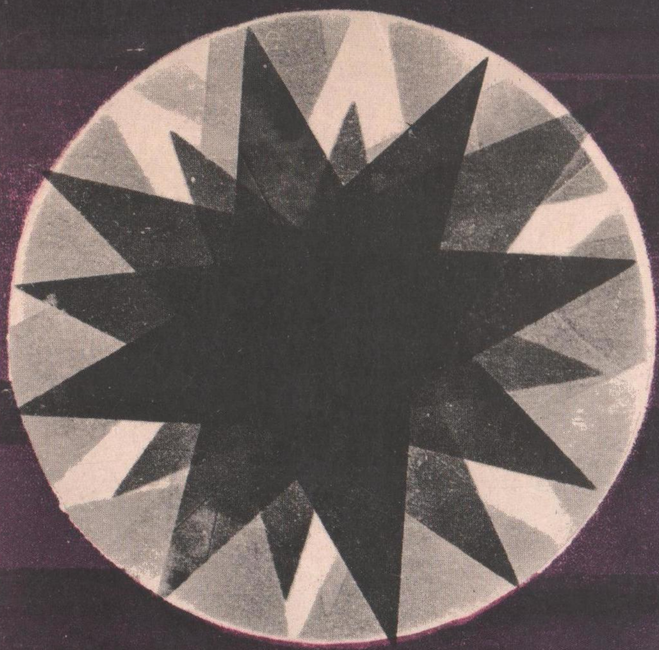


Sterrenkunde



Sterrenkunde 2

Sterrenkunde

IN VIER DELEN

samengesteld onder leiding van PROF. DR. C. DE JAGER

met medewerking van

PROF. DR. G. B. VAN ALBADA | DR. A. D. FOKKER JR.

DR. W. DE GRAAFF | DR. G. VAN HERK

DR. M. KUPERUS | PROF. DR. M. G. J. MINNAERT

IR. J. VAN NIEUWKOOP | PROF. DR. L. PLAUT

DR. E. RAIMOND | DR. J. J. RAIMOND JR. †

DRS. J. ROSENBERG | PROF. DR. A. H. WAPSTRA

DR. C. ZWAAN

WETENSCHAPPELIJKE UITGEVERIJ AMSTERDAM

Sterrenkunde

TWEEDE DEEL

HET PLANETENSTELSEL

DE ZON

1969 WETENSCHAPPELIJKE UITGEVERIJ AMSTERDAM

Dit werk is tot stand gekomen met steun van de Stichting Leids Kerkhoven-Bosscha Fonds ter bevordering van de sterrenkunde.

Typografie en omslag: Wim J. Koster.

Inhoudsopgave

De zon

Dr. C. Zwaan en *Dr. M. Kuperus*

I Het planetenstelsel

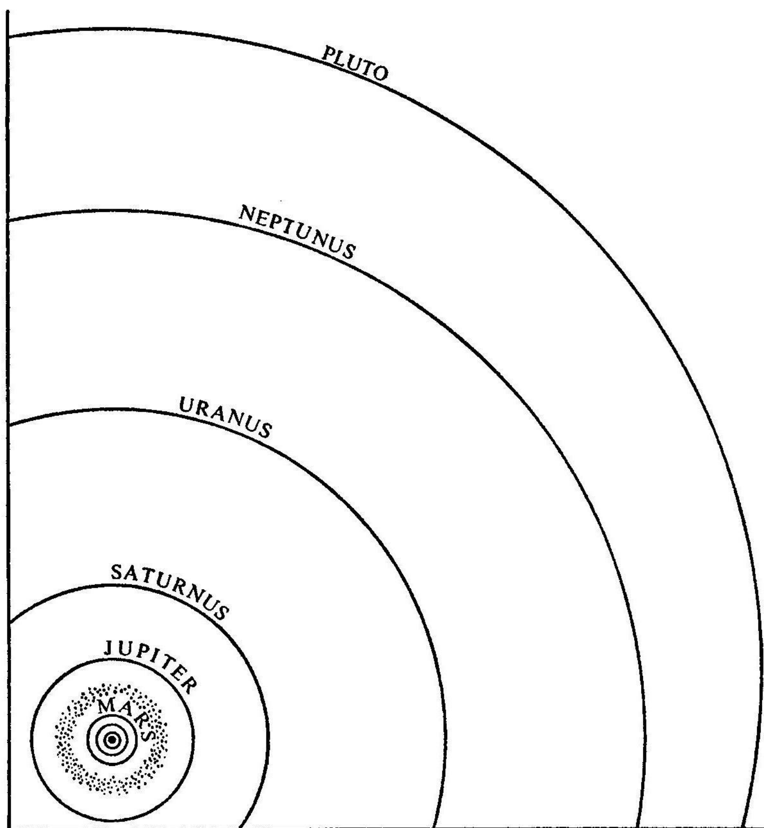
PROF. DR. M. G. J. MINNAERT *Sterrenkundig Instituut te Utrecht*

I.1 DE BEWEGINGEN IN HET PLANETENSTELSEL

I.1.1 *Bouwplan van het zonnestelsel*

Waarneming van de sterrenhemel met het blote oog is al voldoende om ons te leren dat de sterren nauwkeurig dezelfde onderlinge standen ten opzichte van elkaar behouden. Wij zien echter ook enkele lichtstipjes die zich in de loop van enkele maanden of jaren over grote afstanden tussen de sterren verplaatsen en die daarbij steeds ongeveer dezelfde grote cirkel aan het hemelgewelf volgen, waarlangs ook de zon en de maan bewegen (*ecliptica*). Dit zijn hemellichamen die zich veel dichter bij ons bevinden dan de sterren; samen met de aarde vormen ze een kleine zwerm hemelbollen die om de zon lopen: men noemt ze dwaalsterren of planeten (*πλανάομαι* = ik zwerf), en spreekt van het planetenstelsel. Deze planeten brengen zelf geen zichtbare straling voort, ze hebben een veel lagere temperatuur dan de sterren en zijn alleen zichtbaar, doordat ze verlicht worden door de zon.

De bewegingen van de planeten langs de ecliptica zijn op het eerste gezicht verwarrend en ingewikkeld. Copernicus (1543) heeft echter laten zien, dat deze ingewikkeldheid ontstaat, doordat de aarde die de waarnemer draagt, zich temidden van de planeten bevindt en zelf in beweging is. Van een punt buiten het planetenstelsel kijkend zou men zien, hoe de verschillende planeten eenvoudige, bijna cirkelvormige banen afleggen, alle in dezelfde omloopszin ('rechtlopend'), maar elk met zijn eigen omloopstijd; al die banen liggen ongeveer in één vlak, het vlak van de



Afb. 1 De banen van de planeten. Binnen de baan van Mars onderscheidt men nog de banen van de aarde, Venus en Mercurius. De straal van de aardbaan bedraagt 150 miljoen kilometer.

ecliptica (afb. 1).

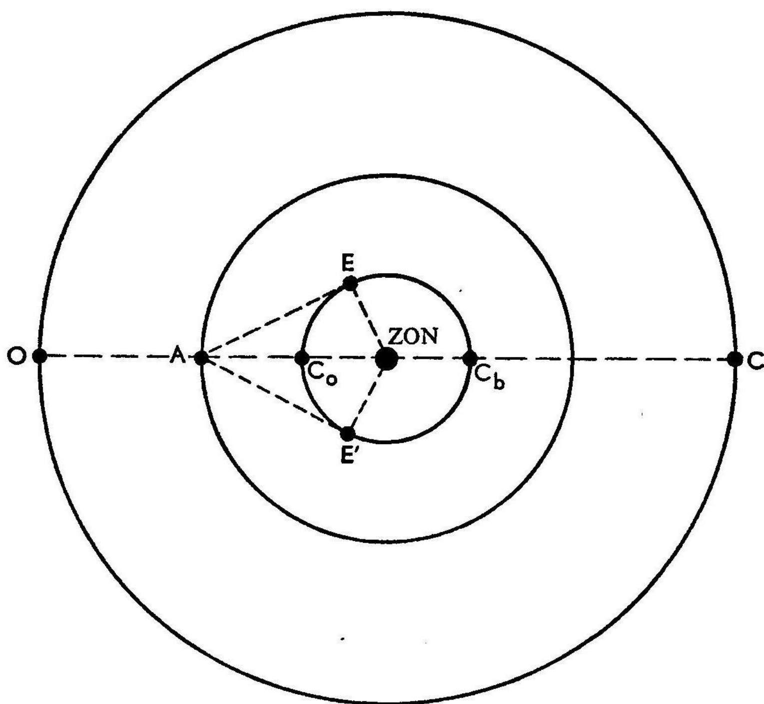
Hier volgt de lijst van de planeten, in volgorde van hun afstand tot de zon:

binnenplaneten	Mercurius
	Venus
de aarde	

	Mars
	de planetoïden
	Jupiter
buitenplaneten	Saturnus
	Uranus
	Neptunus
	Pluto

De meeste van deze planeten hebben wachters of satellieten, die veel kleiner zijn en om de planeet draaien, dikwijls in een vlak dat weinig van de ecliptica afwijkt. Terwijl de planeten hun banen beschrijven (revolutie om de zon), draaien ze ook om hun eigen as (rotatie). Hetzelfde geldt voor de wachters.

Door de onderlinge verschuivingen van de aarde, de zon en de individuele planeten ontstaan allerlei kenmerkende configuraties of aspecten.



Afb. 2 Planetenconfiguraties.

Wij zien, hoe de binnenplaneten zich nooit verder dan tot een bepaalde maximale hoekafstand van de zon verwijderen en hun grootste elongatie bereiken (E, E' in afb. 2). Wanneer we van de aarde A uit een planeet in de richting van de zon zien, is deze in conjunctie (C), daartegenover in oppositie (O). Bij een binnenplaneet onderscheiden we nog de onderste en de bovenste conjunctie (C_o en C_b). Soms zien we een binnenplaneet bij onderste conjunctie vóór de zonneschijf langs gaan; dergelijke overgangen van Mercurius of Venus zijn in allerlei opzichten zeer interessant.

Wat het stelsel samenhoudt, is de algemene aantrekkingskracht of gravitatiekracht (beschreven in de wet van Newton, 1687). De verreweg overheersende kracht is die van de zware zon, in het centrum van het stelsel, die de planeten naar zich toe trekt. Dat de planeten niet in de zon terechtkomen, is daaraan toe te schrijven dat ze met grote snelheid hun cirkelbanen beschrijven, en daarbij door de middelpuntvliedende kracht naar buiten gedreven worden.

1.1.2 *Afstanden*

Het evenwicht van deze twee krachten bepaalt de samenhang tussen de omloopstijd van elke planeet en de afstand ervan tot de zon.

Beschouw eenvoudigheidshalve de planeetbanen als cirkels. De kracht naar de zon toe is volgens de wet van Newton

$$K = G\frac{Mm}{r^2},$$

met G = gravitatieconstante; M = massa van de zon; m = massa van de planeet; r = afstand van de planeet van de zon (voerstraal). De kracht van de zon af is de middelpuntvliedende kracht die bepaald wordt door de snelheid van de planeet in haar baan $v = 2\pi r/P$ (P = omloopstijd van de planeet). Volgens een bekende stelling uit de mechanica bedraagt de middelpuntvliedende kracht

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{m}{r}\cdot\left(\frac{2\pi r}{P}\right)^2 = \frac{4\pi^2 rm}{P^2}.$$

Op elk ogenblik zijn deze twee krachten gelijk en tegengesteld.

Hieruit volgt:

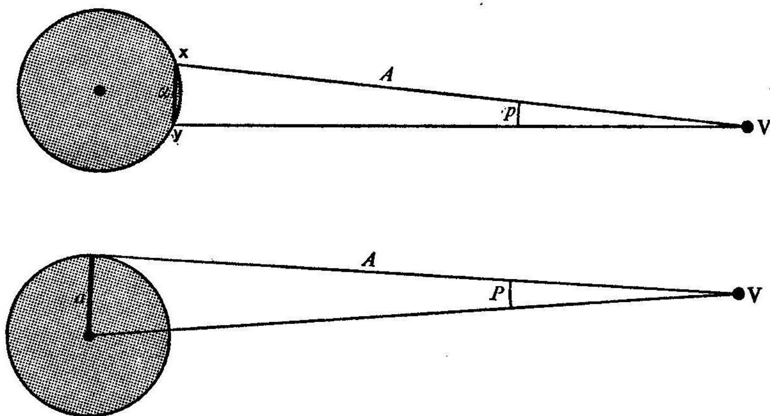
$$G\frac{Mm}{r^2} = \frac{4\pi^2 rm}{P^2} \text{ of } P^2 = \frac{4\pi^2}{GM}r^3.$$

Dit is de beroemde harmonische wet, die reeds door Kepler empirisch was gevonden (1618). Lange tijd bleef M onvoldoende nauwkeurig bekend. Maar aangezien we de verhoudingen van de omloopstijden uiterst

precies kunnen waarnemen, kunnen we althans de verhoudingen van de afstanden van de planeten tot de zon bepalen, op een constante factor na. We kunnen dus het bouwplan van het stelsel tekenen, maar moeten nog de schaal vaststellen. Hiertoe is het voldoende, de een of andere afstand in het stelsel nauwkeurig te meten; dit is een van de belangrijkste, maar tevens een van de moeilijkste bepalingen in de astronomie.

Van twee punten x en y op aarde, die een afstand a van elkaar verwijderd zijn, nemen we Venus waar (V); zie afb. 3. De planeet vertoont aan de twee waarnemers twee lichtelijk verschillende standen ten opzichte van de hemelachtergrond; dit richtingsverschil, in radialen uitgedrukt, wordt gegeven door het hoekje $p = a/A$ (in radialen uitgedrukt). Men vindt dus de afstand van de planeet uit $A = a/p$. Gewoonlijk herleidt men de waarneming op de hoek P, die men zou meten, indien de waarnemers zich op een afstand a van elkaar bevonden, gelijk aan de equatoriale straal van de aarde; P is dan de (equatoriale) *parallax* en $A = a/p = a/P$. Uit de aldus bepaalde afstand volgen alle andere afstanden in het zonnestelsel. Men kan ook uitgaan van de waarneming van Mars; of nog beter van sommige planetoïden (Eros), die dicht tot de aarde naderen en er uitzien als heel scherpe lichtstipjes.

Een geheel andere, moderne methode bestaat in het uitzenden van een scherpe flits radargolven met een zeer krachtige zender. Deze golven worden door de naburige planeten teruggekaatst (Mercurius, Venus, Mars, Jupiter); uit het tijdsverschil tussen sein en echo volgt onmiddellijk de afstand. Dergelijke metingen hebben geleid tot een bepaling van de



Afb. 3 Bepaling van de afstand van een planeet tot de aarde uit haar parallax.

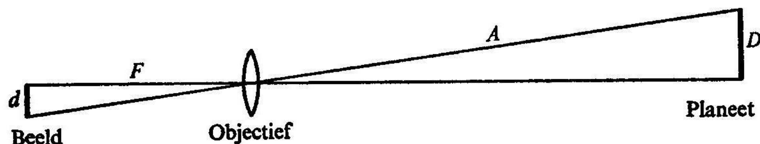
afstand aarde-zon met een honderd maal grotere nauwkeurigheid dan vroeger bereikbaar was. Deze fundamentele constante wordt in de sterrenkunde als een eenheid van afstand gebruikt en heeft de naam gekregen van astronomische eenheid (A.E.). Deze bedraagt 149 598 000 km, overeenkomend met een zonsparallax van 8″, 79 417. De in deze eenheid uitgedrukte afstanden van de verschillende planeten zijn samengevat in onderstaande tabel (zie ook deel 2, I.5). Allerlei regeltjes zijn beproefd, die de opeenvolging van de planeetafstanden bij benadering weergeven. Een van de bekendste is de regel van Titius-Bode:

4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	
0	3	6	12	24	48	96	192	384	768	+
4	7	10	16	28	52	100	196	388	772	voorspeld
4	7	10	15	29	52	95	192	301	395	waargenomen
M	V	A	M	pl.	J	S	U	N	P	

Een andere is die van Richardson: afstand = $(1{,}728)^n$, met $n = -2, -1, 0, 1, 2, \ldots$ De overeenstemmingen zijn gebrekkig en er zijn correcties nodig. De werkelijke wet zou alleen te vinden zijn als men wist hoe het zonnestelsel ontstaan is.

I.1.3 *Afmetingen van de planeten*

Bij waarneming met een kijker vormt zich het beeld van een planeet in het brandvlak van het instrument op een afstand F van het objectief. Zelfs bij onze sterkste kijkers zijn de beelden van de planeten toch niet groter dan enkele mm. Men kan de middellijn d van het planetenbeeldje direct uitmeten of op de fotografische opnamen bepalen (afb. 4). Hieruit volgt dan de middellijn van de planeet zelf: $D = d.A/F$. De resultaten van dergelijke bepalingen vindt men in de tabel in deel 2, I.5. Evenzo worden de afmetingen bepaald van allerlei details, de afstand van de planeet tot haar satelliet enzovoort.



Afb. 4 Bepaling van de middellijn van een planeet.

De afmetingen van de planeten zijn uitermate gering ten opzichte van hun onderlinge afstanden. Stellen we de zon voor door een bol met een middellijn van één meter, dan wordt de aarde een knikkertje met een middellijn van één centimeter, op 108 meter daarvandaan; Neptunus heeft een middellijn van vier centimeter en beschrijft zijn baan op een afstand van drie kilometer.

I.1.4 *Snelheid, massa, dichtheid*

Wanneer we de banen van de planeten door cirkels benaderen, vinden we gemakkelijk de lineaire snelheid van de planeet uit de reeds eerder gegeven betrekking:

$$\frac{mv^2}{r} = G\,\frac{Mm}{r^2}, \text{ dus } v = \sqrt{\frac{GM}{r}}.$$

Hoe dichter dus een planeet bij de zon staat, des te sneller haar vaart is.

De massa van een hemellichaam wordt gemeten door te onderzoeken hoe het een ander hemellichaam aantrekt, welke versnelling het aan dat andere hemellichaam geeft. Wij willen bijvoorbeeld de massa van Jupiter vergelijken met die van de aarde. Daartoe onderzoeken we, hoe Jupiter een van zijn satellieten doet bewegen – de vierde satelliet bijvoorbeeld – en hoe de aarde de maan aantrekt. Noem P en r de omloopstijd en afstand van de maan, P' en r' dezelfde grootheden voor de satelliet IV van Jupiter. Uit de hierboven reeds afgeleide betrekking volgt:

$$\left.\begin{aligned} &\text{stelsel aarde-maan} \ldots\ P^2 = \frac{4\pi^2}{GM}\,r^3 \\ &\text{stelsel Jupiter-IV} \ldots\ P'^2 = \frac{4\pi^2}{GM'}\,r'^3 \end{aligned}\right\}\quad \frac{P^2}{P'^2}\cdot\frac{r'^3}{r^3} = \frac{M'}{M}.$$

Vul in de getalwaarden: $P = 27^d, 3$; $P' = 16^d, 7$; $r = 384\,000$ km; $r' = 1\,881\,000$ km. Hieruit volgt $\frac{M'}{M} = \frac{\text{Jupiter}}{\text{aarde}} = 315$.

Als de planeet geen satelliet bezit, is het bepalen van de massa veel moeilijker: men moet deze dan afleiden uit de storing die zij teweegbrengt op naburige planeten of voorbij bewegende ruimteschepen. Dit is het geval voor Mercurius en Venus en voor de satellieten van de planeten.

Uit de afmetingen volgt het volume, uit het volume en de massa berekent men het soortelijk gewicht.

Uit het hierboven gegeven overzicht bemerkt men, dat de wet van

Newton fundamenteel is voor alle onderzoekingen betreffende het bouwplan van het stelsel. Inderdaad kunnen de oneindig ingewikkelde bewegingen van de planeten en satellieten tot in bijzonderheden worden berekend uit die éne enkele krachtenwet: Twee willekeurige massadeeltjes *m* en *m'* trekken elkaar aan evenredig met het produkt *mm'* en omgekeerd evenredig met het kwadraat van hun afstand *r*:

$$K = G\frac{mm'}{r^2}.$$

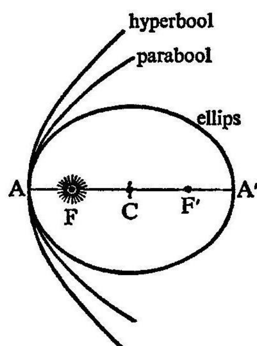
Deze wet beschrijft de beweging van een vallende steen, de getijden van de zee, de loop van de planeten en van de dubbelsterren met éénzelfde constante. Zij is geldig in alle delen van het heelal. Het is een van de meest algemene en meest grootse natuurwetten.

Men merke op, dat de kracht die *m* op *m'* uitoefent, een gravitatieversnelling $G\frac{m}{r^2}$ veroorzaakt. De waargenomen beweging van een satelliet leert ons dus wel de massa van de aantrekkende planeet kennen, maar niet de massa *m'* van de satelliet zelf.

In het laboratorium kan men de versnelling meten, die een zware loden bal op een proeflichaampje uitoefent (Cavendish, 1798); aangezien de massa van de loden bal bekend is, volgt hieruit direct de waarde van de gravitatieconstante $G = 6{,}668.10^{-8}$ dyn cm^2/g^2. Zulk een massieve bol werkt op een punt daarbuiten, alsof de massa ervan geheel in het centrum geconcentreerd was, en hetzelfde geldt voor de hemellichamen, die immers ongeveer bolvormig zijn; indien echter de planeet merkbaar afgeplat is, moet een fijnere berekening worden uitgevoerd. Twee zeer zware loden bollen met een middellijn van één meter, bijna aan elkaar rakend, trekken elkander aan met een kracht van een kwart gramgewicht. De gravitatie is dus een uiterst zwakke kracht; slechts door de enorme massa van de hemellichamen speelt zij een merkbare rol in het heelal.

1.1.5 *Het tweelichamenprobleem*

Het eenvoudigste vraagstuk van de hemelmechanica is dat van twee lichamen die men als punten kan beschouwen en waarvan de plaats en de snelheid op een gegeven ogenblik bekend zijn. Met behulp van de gravitatiewet weet men hoe zij elkaar aantrekken; nu kan het gehele verdere verloop van de beweging in alle bijzonderheden worden berekend. Hoe de omstandigheden waar men van uitgaat ook zijn, altijd vindt men dat de banen kegelsneden zijn, dus ellipsen, parabolen of hyperbolen. De banen van de twee hemellichamen zijn gelijkvormig en worden beschreven om hun gemeenschappelijk zwaartepunt als brandpunt; het



Afb. 5 Kegelsneden.

zwaarste lichaam beschrijft de kleinste baan (afb. 8). Is een van de twee lichamen veel zwaarder dan het andere, dan beschrijft het laatste een grote baan, terwijl het eerste bijna stilstaat in het brandpunt daarvan: dit is bijvoorbeeld het geval met de zon, waaromheen een planeet beweegt (zie afb. 5). Het zwaartepunt van het stelsel ondervindt geen invloed van de baanbeweging, het blijft in rust of in eenparige rechtlijnige beweging.

Al deze theoretische resultaten worden door de waarneming bevestigd. De planeten beschrijven een ellipsbaan om de zon en de zon bevindt zich in een van de brandpunten *F*, de ellipsen zijn weinig afgeplat en gelijken sterk op cirkels; de planetoïden vertonen dikwijls ellipsbanen die veel sterker afgeplat zijn; de kometen tenslotte hebben zeer langwerpige ellipsbanen, bij een zeker aantal zijn quasi-parabolen of zelfs (tijdelijk) hyperbolen waargenomen.

Een planetenbaan wordt door de volgende elementen gekenmerkt (afb. 6):

1 de halve lange as *CA*; aan de uiteinden bevindt zich het perihelium *A* en het aphelium *A'*;

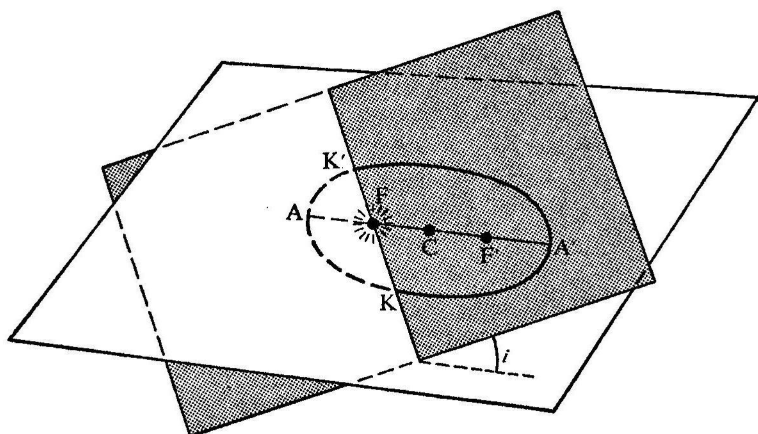
2 de excentriciteit $e = (CF/CA)$, die een maat geeft voor de afplatting; voor een cirkel geldt $e = 0$; naarmate e tot 1 nadert, wordt de ellips meer en meer uitgerekt en nadert tot de parabool;

3 de helling i van het baanvlak ten opzichte van de ecliptica;

4 de plaats van de knopen, *KK'*, waar de baan de ecliptica snijdt; die wordt aangegeven door de richting van de knopenlijn in de ecliptica;

5 de richting van de grote as *AA'* in het baanvlak.

Of de planeet een grote of een kleine baan aflegt, een ronde of een langwerpige, een weinig of een sterk hellende, hangt geheel af van de



Afb. 6 Elementen van een planetenbaan. De ellips AKA′ K′ bevindt zich in het baanvlak dat zich enerzijds boven, anderzijds onder de ecliptica uitstrekt.

krachten die hem zijn beginsnelheid hebben gegeven. De halve lange as a, een van de belangrijkste elementen, is al direct vastgelegd, zodra men weet dat het lichaam een snelheid v had op een afstand r van het aantrekkende centrum. Want dan geldt:

$$v^2 = (M + m)\,(2/r - 1/a).$$

Daardoor is dan tevens de omloopstijd bepaald; Keplers harmonische wet geldt namelijk ook voor ellipsbanen, mits men de halve lange as beschouwt in plaats van de cirkelstraal:

$$P = \frac{2\pi a^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{GM}}\,.$$

Uit de elementen van een planetenbaan kan men de stand van de planeet op elk ogenblik afleiden volgens het volgende rekenschema.

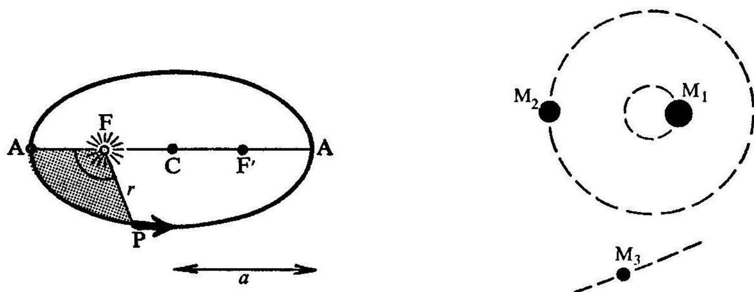
1 Indien de planeet, door het perihelium gaande op het ogenblik T, van dan af een eenparige cirkelbeweging had uitgevoerd met periode P, zou hij op het tijdstip t een hoek hebben afgelegd, die we noemen: de 'middelbare anomalie' $M = 360^\circ \dfrac{t - T}{P}$.

2 In werkelijkheid heeft de planeet een elliptische baan beschreven met excentriciteit e. Dan wordt de 'ware anomalie' (de donkere sector in afb. 7):
$v = M + 2\,e.\sin M + \frac{5}{4}\,e^2.\sin 2M + \frac{1}{12}\,e^3\,(13 \sin 3M - 3 \sin M) + \ldots$

3 Evenzo is, bij kleine excentriciteit, de voerstraal r niet zeer verschillend van de halve grote as a; op elk ogenblik is

$$\frac{r}{a} = 1 - e\cos M - \frac{e^2}{2}(\cos 2M - 1) - \frac{e^3}{8}(3\cos 3M - 3\cos M) - \ldots$$

De plaats van de planeet is aldus in poolcoördinaten bepaald. Omgekeerd kan men uit waargenomen posities de elementen van de planetenbaan afleiden. De positie moet dan op tenminste drie verschillende ogenblikken waargenomen zijn. De voornaamste moeilijkheid is gelegen in het vinden van de afstand van de planeet in de gezichtslijn; doordat de aarde zich echter in de perioden tussen de waarnemingen verplaatst, zien we de planeet van verschillende standpunten en kunnen haar afstand vinden. De berekening is tamelijk ingewikkeld en kan geschieden volgens de klassieke methoden van Laplace of Gauss, die later gemoderniseerd zijn.



Afb. 7 Positie van een planeet in haar baan; de beweging is rechtlopend. In werkelijkheid is de baan veel minder afgeplat en wijkt maar weinig van de cirkel af.

Afb. 8 Het 'problème restreint' van de hemelmechanica.

I.1.6 *Het drielichamenprobleem*

Veel ingewikkelder is de beweging van drie lichamen die elkaar onderling aantrekken. Pas in 1915 heeft Sundman een algemene oplossing gevonden, maar deze is zo moeilijk uit te rekenen, dat men praktisch toch op de numerieke methoden aangewezen is. Voor elk bijzonder geval kan de beweging van de hemellichamen met grote nauwkeurigheid berekend worden; de kunst is, de talloze verschillende mogelijkheden te overzien. Speciaal E. Strömgren en zijn medewerkers te Kopenhagen hebben zich op dit gebied verdienstelijk gemaakt. De eigenschappen van de banen

hangen in hoofdzaak af van de verhouding van de drie massa's M_1, M_2, M_3. De volgende gevallen zijn uitvoerig theoretisch onderzocht:

$M_1 > M_2$, in cirkels om elkaar bewegend; M_3 te verwaarlozen klein, bewegend in het baanvlak van M_1 en M_2 (*Problème restreint* van Jacobi, 1830, en Poincaré, 1880; vergelijk afb. 8).

$M_1 \approx M_2$; overigens als het vorige geval (*uitgebreid problème restreint*).

Het problème restreint heeft belangwekkende bijzondere oplossingen: wanneer de kleine massa M_3 zich in een van de vijf *libratiepunten* bevindt, kan het stelsel van de drie lichamen als een geheel draaien en blijven M_1 M_2 M_3 steeds in dezelfde stand ten opzichte van elkaar. De twee interessantste libratiepunten, aangeduid met L_4 en L_5, vormen ieder een gelijkzijdige driehoek met de hoofdmassa's M_1 en M_2. Deze gevallen komen inderdaad in het planetenstelsel voor: de zon en Jupiter met de Trojanen (zie deel 2, I.5.4 en afb. 25); de aarde en de maan met de wolken van Kordylewski (zie deel 2, I.6.3).

I.1.7 *Storingen*

Zelfs het eenvoudige probleem van de twee lichamen wordt onmiddellijk veel ingewikkelder, zodra storende krachten werken. Bijvoorbeeld: 1. een van de hemellichamen is afgeplat; 2. de beweging geschiedt door een weerstand biedende middenstof; 3. een derde lichaam oefent ook een zwakke kracht uit. Om deze gestoorde bewegingen te berekenen, kan men nagaan, hoeveel de plaats van het hemellichaam zal afwijken van het ongestoorde probleem. Men kan echter ook aangeven, hoe de elementen van de baan in de loop van de tijd gewijzigd zullen worden; dit laatste zal men doen bij seculaire storingen die gedurende lange tijd en uiterst langzaam doorwerken.

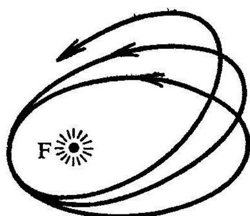
1 Invloed van de afplatting van het aantrekkende lichaam (planeet op satelliet): de helling van het baanvlak ten opzichte van het equatorvlak van de planeet verandert niet, de halve lange as en de excentriciteit schommelen iets, maar behouden dezelfde gemiddelde waarde. De richting van de lange as draait geleidelijk in het baanvlak. De knopenlijn loopt gelijkmatig terug in het equatorvlak.

2 Invloed van een weerstand biedende middenstof: de helling van de baan verandert niet; de halve lange as en de excentriciteit nemen geleidelijk af.

3 Invloed van een derde lichaam: de helling, de excentriciteit en de halve lange as schommelen periodiek, de omloopstijd wordt langer. Een goed voorbeeld is de storende werking van de zon op het stelsel aarde–maan.

In het planetenstelsel zijn de onderlinge storingen natuurlijk zeer inge-

wikkeld. De banen veranderen van excentriciteit en helling, de richtingen van de grote assen en van de knopenlijnen veranderen, de planeten zijn vóór of achter in hun baan, vergeleken met de stand bij ongestoorde beweging. Al deze effecten vertonen perioden van duizenden tot miljoenen jaren. Toch is het gehele stelsel stabiel, de planeten vallen niet in de zon en hun onderlinge storingen kunnen de samenhang van het geheel niet in gevaar brengen, zelfs niet na miljoenen jaren. Het bewijs voor die stabiliteit, destijds gegeven door Laplace en Lagrange (1776), is nochtans theoretisch niet volkomen overtuigend voor de verst verwijderde tijden. Hoe ingewikkeld de bewegingen in het planetenstelsel ook zijn, constant blijft 'het onveranderlijke vlak'; het gaat door het zwaartepunt van het gehele stelsel en is zó gericht, dat ten opzichte van zijn normaal het totale impulsmoment een maximum is. Dit vlak stemt op weinig na overeen met het baanvlak van Jupiter.



Afb. 9 Periheliumbeweging.

I.1.8 *De laatste verfijningen*

De algemene relativiteitstheorie heeft aangetoond, dat er een uiterst kleine correctie in Newtons gravitatiewet moet worden aangebracht. Deze correctie wordt zonder hulponderstellingen berekend en blijkt precies groot genoeg om de beweging te verklaren, die men heeft waargenomen aan de planeet Mercurius: de lange as draait in het baanvlak over 43″ per eeuw, zodat de planeet een soort rozet beschrijft (periheliumbeweging, afb. 9).

Ook nadat alle storingen in rekening gebracht zijn, blijven er afwijkingen van de planeten ten opzichte van de vooruit berekende standen. Deze moeten worden toegeschreven aan uiterst kleine veranderingen in de omwenteltijd van de aarde.

Tegenwoordig worden de banen van de planeten en hun standen voor vele jaren vooruit berekend met behulp van elektronische rekenmachines, zodat alle storingen in de berekening verwerkt kunnen worden (Brouwer, Clemence).

I.1.9 *De getijkrachten*

Tot hiertoe hebben wij alleen de krachten beschouwd, die werken op het massacentrum van de hemellichamen. We moeten nu ook de differentiële effecten onderzoeken voor punten buiten dit centrum. Een planeet, draaiend om de zon, ondervindt getijkrachten die ernaar streven, deze planeet uit te rekken in de richting van de verbindingslijn. De aantrekkingskracht, op de massa-eenheid in het centrum uitgeoefend, is namelijk $K = G\frac{M}{R^2}$. Een punt aan de omtrek, dat naar de zon gekeerd is, bevindt zich op een afstand $R - \Delta R$ van dit hemellichaam; het tegenoverstaande punt op een afstand $R + \Delta R$. Deze punten ondergaan dus aantrekkingskrachten die respectievelijk groter of kleiner zijn dan die in het centrum; het verschil bedraagt $\Delta K = \pm G\frac{M}{2R^3}\Delta R$. Bij het beschrijven van de baan is er evenwicht tussen de middelpuntvliedende kracht in het centrum en de in het centrum heersende aantrekkingskracht. Aan de kanten die naar de zon of van de zon af gericht zijn, blijft de getijkracht ΔK over. Deze kracht werkt eveneens op een satelliet, bewegend om een planeet. Zijn de twee hemellichamen van vergelijkbare grootte (aarde en maan), dan zullen zij beide de invloed van de getijkracht ondergaan. Die kracht is het, welke de getijden verwekt van de oceanen, van de dampkring en van de vaste aarde. Zij veroorzaakt daardoor de vertraging van de aardrotatie en de evolutie van het stelsel aarde-maan. De betekenis ervan voor de evolutie van het planetenstelsel in het algemeen blijkt uit het bestaan van de limiet van Roche (zie deel 2, I.7.2). Behalve van de maan ondervindt de aarde ook getijkrachten van de zon, die echter zwakker zijn.

I.2 METHODEN VOOR HET ASTROFYSISCH ONDERZOEK VAN PLANETEN

I.2.1 *Waarneming met kijker en fotografie*

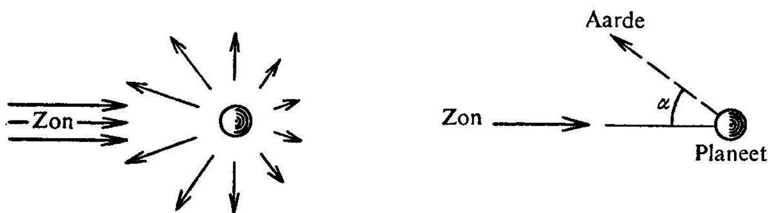
De moderne astrofysica heeft zich vooral ontwikkeld door het onderzoek van de sterren, omdat ijle gassen bij hoge temperatuur aan allerlei eenvoudige natuurkundige wetten gehoorzamen. In de laatste tijd richt men echter de astrofysische machtsmiddelen ook met succes op de zoveel moeilijker te onderzoeken planeten.

De waarneming van de details van het oppervlak stelt de hoogste eisen aan de kwaliteit van de kijker en aan de rust van de dampkring. Voortreffelijk werk op dit gebied is in de laatste tijd geleverd door Slipher

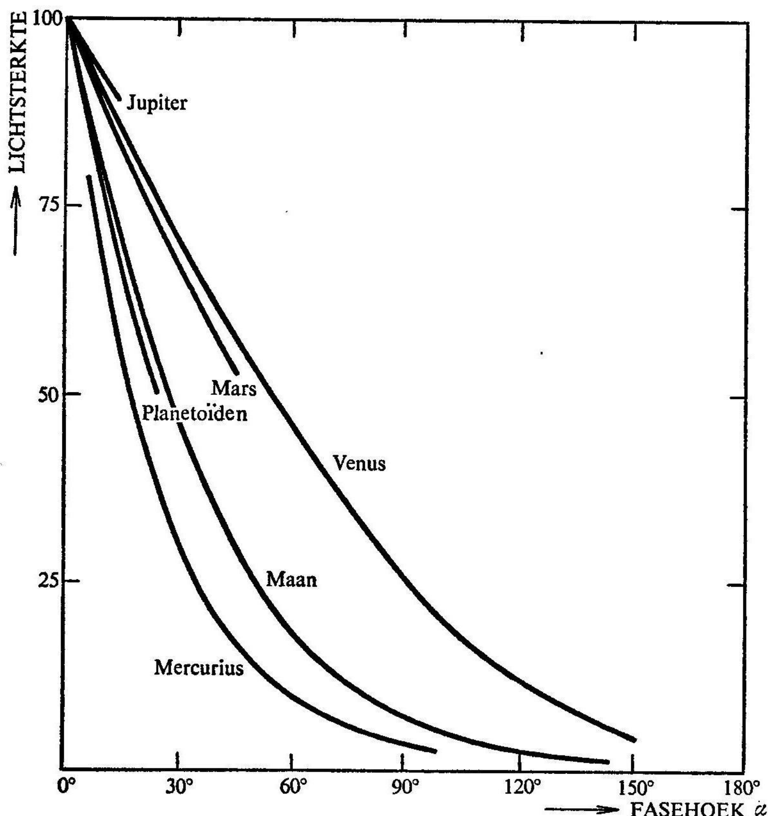
(Flagstaff), Lyot en Dollfus (Pic-du-Midi), Kuiper (MacDonald, Kitt Peak) en anderen. Tot voor kort mocht men zeggen, dat het oog fijnere details kan waarnemen dan de fotografische plaat. Dit is echter niet meer het geval sedert de invoering van de fijnkorrelige platen en de vervaardiging van 'samengestelde opnamen' (Lyot). Bij de laatste methode maakt men een tiental opnamen kort na elkaar en drukt die successievelijk af op hetzelfde positief, zodat de ongelijkheden van de plaat zich uitmiddelen. De fotografische plaat wint het dan van het oog, niet alleen in snelheid en precisie van afbeelding, maar ook in de weergave van geringe helderheidsverschillen en wazigheden. Naast de waarneming van de straling wordt echter het fysisch onderzoek van de straling van meer en meer belang.

I.2.2 *Fotometrie*

Om de aard van een vast oppervlak of van een wolkenlaag te kunnen beoordelen, is het van belang te weten hoe dit het opvallende licht verstrooit. Een volledige beschrijving van het fotometrische gedrag krijgen we, wanneer we een lichtbundel in allerlei verschillende richtingen laten invallen en telkens, ook van allerlei richtingen uit, waarnemen hoe sterk het verstrooide licht is. Bij de planeten is dit slechts ten dele mogelijk. De onderlinge stand van zon, planeet en aarde kan zich wijzigen, zodat de fasehoek α verandert (zie afb. 10 en 11); daarenboven kan men allerlei punten van het oppervlak onderzoeken, die het licht onder verschillende hoeken ontvangen en verstrooien. Bij de buitenplaneten is onze kennis onvollediger, omdat de fasehoek in dit geval een beperkt bedrag niet overschrijdt. De fotometrische eigenschappen van een vaste stof kunnen nog niet goed op fysische grondslag worden voorspeld: men kan echter zoeken naar aardse stoffen die zich ongeveer op dezelfde wijze als de planeet gedragen. Niet alleen de aard van de stof, maar ook de graad van ruwheid speelt een rol, de schaduwen geworpen door hobbels,



Afb. 10 Links: de albedo (naar Bond); rechts: de fasehoek α.



Afb. 11 Lichtsterkte-fasekrommen. De wijze waarop de lichtsterkte van de planeet afneemt met de fasehoek, is voor planeten met een dampkring anders dan voor de andere.

enzovoort. We krijgen een globale indruk van de witheid van een planeet door de bepaling van de

$$\text{sferische albedo} = \frac{\text{in de ruimte teruggezonden licht}}{\text{invallende lichtstroom}}.$$

In het algemeen hebben wolkenlagen een veel hogere albedo dan gesteenten.

I.2.3 *Absorptiespectrum*

Als men het licht van de planeten met een spectroscoop ontleedt, verkrijgt men een spectrum dat in hoofdzaak op het zonnespectrum gelijkt, en dat

bestaat uit een heldere continue achtergrond met een aantal donkere fraunhoferlijnen: dit bewijst dat de planeten door zonlicht verlicht worden.

Behalve dit bemerken we echter:

a dat het continue spectrum in bepaalde kleuren verzwakt is ten opzichte van het zonnespectrum;

b dat er ook moleculebanden voorkomen, die niet in het spectrum van de zon te zien zijn en die we dus aan absorptie in de dampkring van de planeet moeten toeschrijven. De moleculebanden vertonen typische lijnverdichtingen en regelmatig uitlopende lijnenreeksen die dikwijls in het laboratorium gereproduceerd en theoretisch verklaard kunnen worden. Uit het verloop van de lijnsterkten binnen een band kan men afleiden, hoe hoog de temperatuur van het gas is. Om de hoeveelheid gas te bepalen, vergelijkt men de lijnsterkte met het absorptiespectrum van een lange gaslaag in het laboratorium (100 m en meer). Niet alle moleculen echter hebben absorptielijnen in het zichtbare of fotografeerbare spectrale gebied: waterstof en stikstof, bijvoorbeeld, kunnen spectroscopisch niet of moeilijk opgespoord worden in de planeetatmosferen. In de laatste tijd heeft het onderzoek van het nabije infrarood zeer interessante resultaten opgeleverd; dit geschiedt het best met speciale, voor dit gebied gevoelige fotocellen (zie deel 1, II.4.2 en deel 1, II.4.3).

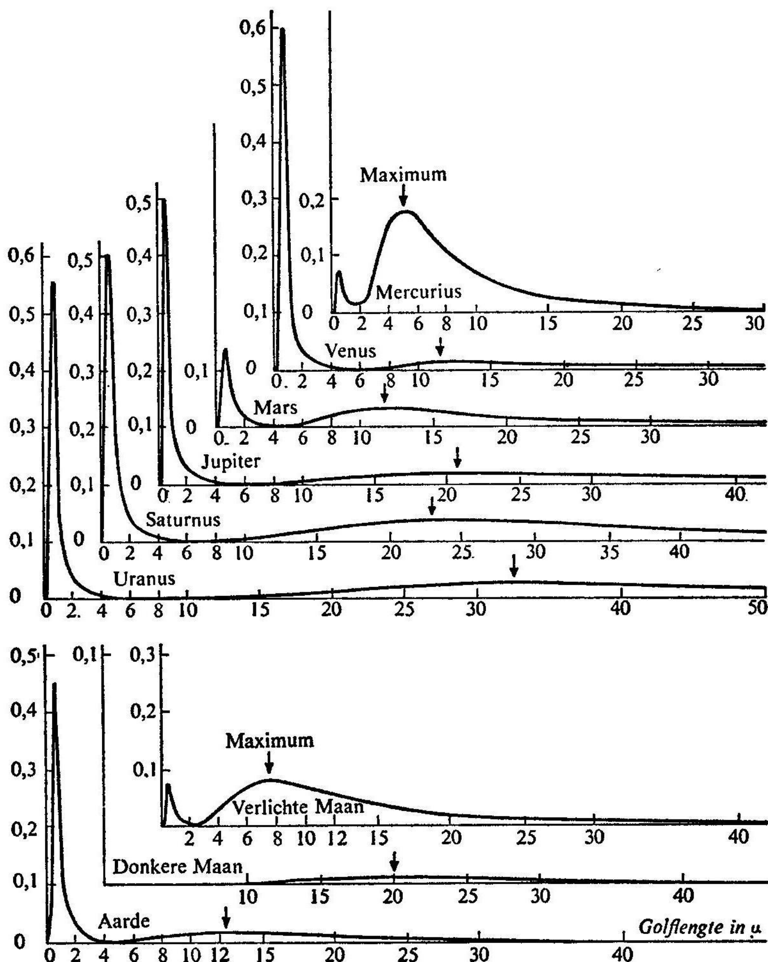
I.2.4 *Fotografie met kleurenfilters*

Fotografeert men een planeet in blauw licht en daarna in rood licht, dan ziet men dikwijls karakteristieke verschillen die erop wijzen dat deze lichtsoorten op verschillende wijze over het oppervlak verdeeld zijn. Met andere woorden: de verschillende delen van het oppervlak vertonen verschillende kleuren. Nu fotografische platen te krijgen zijn voor het uiterste ultraviolet en voor het infrarood, bestaat de mogelijkheid, opnamen te vergelijken in wijd uiteenliggende kleurgebieden. W. H. Wright, F. E. Ross en C. Slipher hebben aldus belangrijke resultaten verkregen.

I.2.5 *Straling in het verre infrarood*

De straling van een planeet (zie afb. 12) bestaat niet alleen uit verstrooid zonlicht; een deel van de zonnestralen is door de planeet geabsorbeerd en heeft het oppervlak verwarmd; dit zendt de ontvangen energie nu uit in de vorm van infrarode straling, passend bij zijn temperatuur, dus voornamelijk in het golflengtegebied van 8-15 μ. Om beide stralensoorten te scheiden, maakt men gebruik van een filter dat alleen het verre infrarood doorlaat of van een monochromator. Indien de planeet als een volkomen straler in dit gebied beschouwd mag worden, is de gemeten

straling gelijk aan σT^4 (wet van Stefan-Boltzmann): men kan dus direct de absolute temperatuur berekenen. Anders kan men een correctiefactor invoeren. De absorptie van het licht door de aardse dampkring in bepaalde infrarode spectrumgebieden stoort de metingen en moet weg-



Afb. 12 Straling van de planeten in het infrarood (berekend naar Minnaert, Houtgast en Boersma; *Hemel en Dampkring*, 1945). De scherpe top is de verstrooide zonnestraling, het brede maximum in het verre infrarood is de eigenstraling van de planeet.

gerekend worden. De stralingsmetingen geschieden met een miniatuur thermo-elementje dat in het beeld van de planeet gebracht wordt of met een germanium-fotogeleider. De aldus bepaalde temperaturen hebben betrekking op het buitenste oppervlak van de planeet, eventueel op de bovenkant van de wolkenlaag, als de planeet daardoor omhuld is.

I.2.6 *Radiostraling*

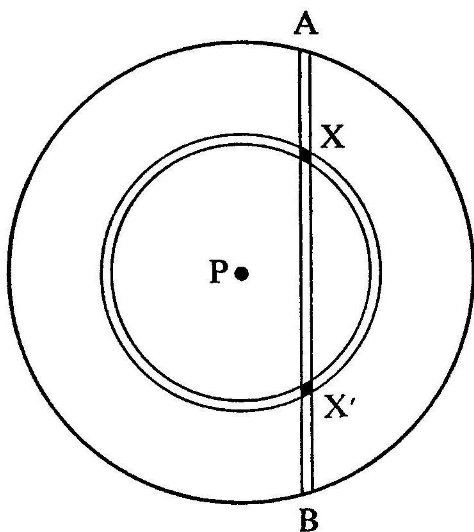
De straling van de planeten bij langere golflengten van mm of cm (korte radiogolven) kan opgevangen en gemeten worden met de moderne radiotelescopen (zie deel 1, III.1.1 en volgende). Deze straling is in het algemeen 'thermisch' en geeft een goede maat voor de temperatuur van de planeet. De radiogolven gaan zonder meer door de wolkenlagen heen; het stralende oppervlak is in dat geval het vaste oppervlak van de planeet, of liever een laagje op enige diepte daaronder. Hoe langer de golflengte is, waarin wij waarnemen, van des te dieper onder het oppervlak is de uitgezonden straling effectief afkomstig. Zo heeft men de mogelijkheid, temperaturen op verschillende diepten onder het planeetoppervlak te bepalen (tot enkele decimeters).

De waargenomen temperaturen kan men vergelijken met de a priori berekende. Neem eerst aan dat de planeet een volkomen straler is, en stel de (bekende) invallende zonnestraling gelijk aan de uitgezonden straling σT^4; daaruit volgt T. Breng daarna correcties aan, om rekening te houden met de verschillen in absorptiecoëfficiënt voor beide groepen stralingen, met de aswenteling van de planeet, enzovoort.

I.2.7 *Terugkaatsing van radargolven*

Een sterk en uiterst kort radarsein wordt van de aarde af uitgezonden, en de terugkaatsing (echo) door de maan of door de planeten wordt enkele seconden of minuten later waargenomen. Uit het tijdsverschil volgt de afstand (zie ook deel 1, III.6.4). Uit de sterkte van de terugkaatsing kan men de diëlektrische constante van het oppervlaktemateriaal afleiden. Vergeleken met het uitgezonden sein heeft het terugkerende sein in het algemeen een langere duur. Dit is daaraan toe te schrijven, dat de golven ook enigszins teruggekaatst of verstrooid worden door de punten van de planeet, die verder verwijderd zijn dan het naar de aarde toegekeerde punt; aldus kan men de gemiddelde hobbeligheid van het oppervlak onderzoeken. Het scherp monochromatische sein is ook bij de terugkeer enigszins over de naburige frequenties verbreed door het doppler-effect: de randgedeelten van de draaiende planeet werken als een naar ons toe of van ons af bewegende spiegel. De brede radarbundel kan niet op bijzonderheden van het oppervlak geconcentreerd worden.

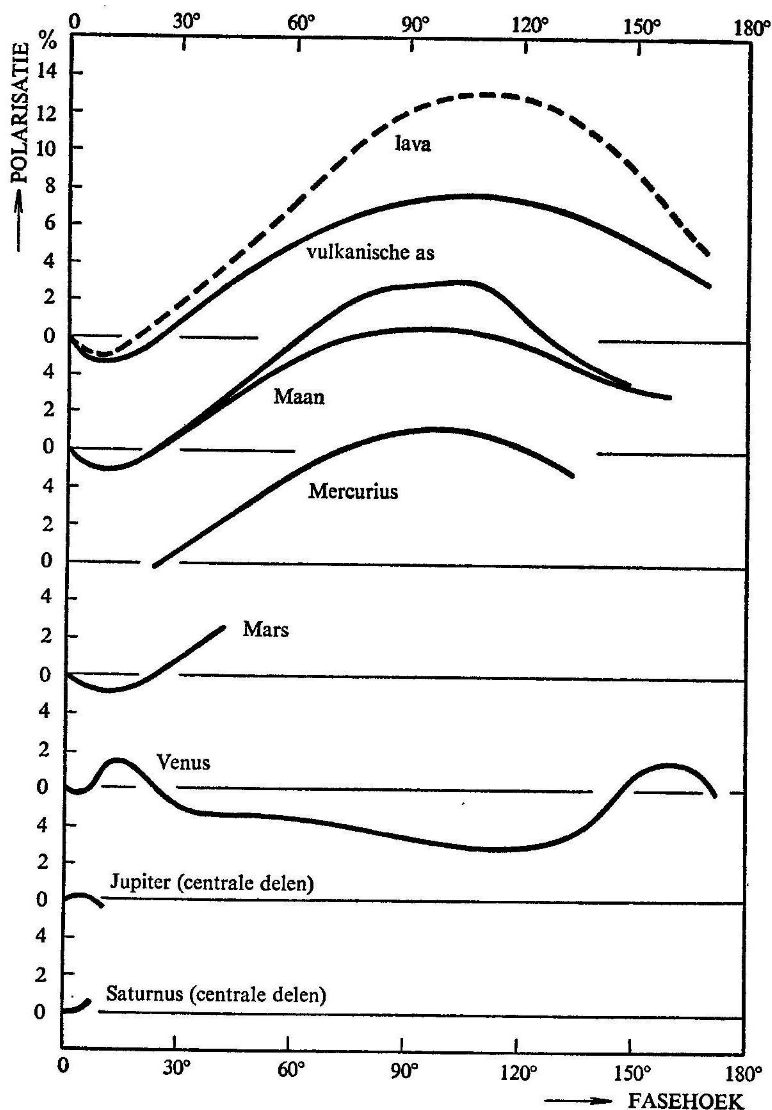
Men past echter *vertraagde doppler-ontvangst* toe en neemt het terugkerende, verbrede sein op een aantal opeenvolgende tijdstippen waar, met tussenruimten van enkele microseconden (afb. 13). Stel de terugkaatsing door het dichtst bij ons gelegen punt P geschiedt op een tijdstip $t = O$. Een sein dat Δt later terugkomt, moet teruggekaatst zijn door een iets verder verwijderd punt ergens op een ring om P. Indien de planeet om haar as draait (of als de maan door libratie schommelt), zullen alle punten op de lijn AB een frequentie-verschuiving Δv vertonen. De reflex op frequentie Δv, aankomend op een tijd Δt, moet dus afkomstig zijn van een der snijpunten X òf X'. Bij de planeten blijft voorlopig die dubbelzinnigheid bestaan; bij de maan kan de radarbundel zo smal gemaakt worden dat hij alleen de éne helft van het hemellichaam treft. Men heeft radarkaarten van de maan verkregen met een scheidend vermogen van een à twee km, vergelijkbaar met de beste aardse foto's! Radarfoto's van Mars en Venus (beneden het wolkendek) zijn primitiever.



Afb. 13 Identificering van een punt op een planeet bij radarwaarneming.

I.2.8 *Polarisatie*

Licht, schuin invallend op een vaste of wolkvormige laag en daardoor verstrooid, vertoont polarisatie. Hoe sterk die polarisatie is, hangt bij de meeste stoffen af van de fasehoek. De kromme die het verband aangeeft,



Afb. 14 Polarisatiefasekrommen van de planeten (naar metingen van Lyot, 1925). De twee krommen voor de maan hebben betrekking op de wassende, respectievelijk de afnemende maan. Voor de definitie van polarisatie zie deel 1, III.6.1.

kan evenmin als de helderheidskromme uit natuurkundige wetten worden afgeleid, maar kan empirisch vergeleken worden met dergelijke krommen, in het laboratorium opgenomen aan bekende stoffen (afb. 14).

I.2.9 *Optische effecten van een dampkring*

Atmosferisch-optische effecten kunnen op aarde waargenomen en bij verschillende planeten teruggevonden worden.

1 De straalkromming (refractie): ten gevolge van het dichtheidsverval in de dampkring krijgen de lichtstralen die er doorheen gaan, een geringe kromming. Hierdoor komt het dat alle sterren ons een weinig hoger lijken te staan dan met de werkelijke positie ervan overeenkomt.

2 De lichtverstrooiing: een lichtbundel die door een dampkring gaat, treft een groot aantal luchtmoleculen, wolkendruppeltjes, stofdeeltjes en wordt erdoor verstrooid. Hoe die verstrooiing geschiedt, hangt af van de grootte van de deeltjes vergeleken met de golflengte λ van het licht (ongeveer 1/2000 mm). Deeltjes veel kleiner dan λ verstrooien 'volgens Rayleigh': vrijwel evenveel naar alle richtingen en des te sterker, naarmate de lichtstralen meer aan de violette kant van het spectrum liggen (evenredig met λ^{-4}). Grotere deeltjes verstrooien meer in voorwaartse richting en in een mate die niet veel van de golflengte afhangt, zodat het verstrooide licht witter wordt. Nog grotere deeltjes breken en weerkaatsen het licht volgens de gewone wetten (vergelijk afb. 15).



Afb. 15 Verstrooiing van het licht door stofjes: a. zeer kleine deeltjes, diameter $< 0{,}1\ \lambda$; b. kleine deeltjes, diameter $= 0{,}3\ \lambda$.

I.2.10 *Ontsnappingssnelheid van de moleculen (Stoney, 1870)*

Wij weten dat in een gas alle moleculen voortdurend in beweging zijn, gemiddeld des te sneller naarmate de temperatuur hoger is en de moleculen lichter zijn; bij éénzelfde gas van gegeven temperatuur is er echter nog een aanzienlijke spreiding in de snelheden van de individuele moleculen (volgens de wet van Maxwell). Er zullen dus in een planeetatmosfeer altijd wel enkele toevallig heel snel bewegende moleculen zijn, die de aantrekkingskracht van de planeet overwinnen en voorgoed in de hemelruimte verdwijnen, zoals een voldoende snel afgeschoten kogel het zou

doen. De daartoe nodige kritische snelheid v is gegeven door de betrekking $\frac{1}{2}\mu v^2 = Gm\frac{\mu}{R}$, dus $v = \sqrt{\frac{2Gm}{R}}$, met μ = massa van een molecule, m en R = massa en straal van de planeet (zie ook deel 2, I.6.2). Als de gemiddelde snelheid van de moleculen een-derde van deze kritische snelheid bereikt, verdwijnt de dampkring in enkele dagen; bereikt ze slechts een-vierde ervan, dan verdwijnt hij in enkele jaren; voor een-vijfde worden het miljoenen jaren. Aangezien men weet dat het planetenstelsel reeds zeer vele miljoenen jaren bestaat, kan men a priori uitrekenen, of een planeet nog een dampkring kan hebben en welke gassen daarin kunnen voorkomen. Er ontstaat enige onzekerheid, doordat we niet overzien wat de uitwerking is geweest van hoge temperaturen die wellicht in de eerste stadia van het bestaan van de planeet hebben geheerst.

I.2.11 *Ruimteonderzoek*

Raketten en ruimteschepen, aanvankelijk onbemand en automatisch werkend, hebben sedert 1959 belangrijke bijdragen tot onze kennis van het planetenstelsel geleverd.

De maan. Eerst is men er in geslaagd, een raket achter de maan langs te leiden en de achterkant te fotograferen; dan liet men een raket op de maan neerploffen, die tijdens zijn val vele foto's opnam en uitzond ('harde landing'); daarna wist men het neerkomen te remmen, zodat instrumenten onbeschadigd het oppervlak bereikten en in werking gezet konden worden ('zachte landing'); tenslotte heeft men ook raketten in een baan om de maan gebracht, vanwaaruit zij het gehele oppervlak fotografeerden.

Mars werd van dichtbij gefotografeerd en onderzocht. Aan *Venus* zijn van dichtbij belangrijke metingen uitgevoerd. In de *interplanetaire ruimte* meet men stofkorrels, magnetische velden en stromen geladen deeltjes.

Het betreden van de maan door mensen geschiedde voor het eerst op 20 juli 1969.

I.3 DE AARDE

I.3.1 *De aarde als planeet*

De vorm van de aarde wordt benaderd door het internationale referentie-ellipsoïde; equatoriale as a = 6378,388 km; polaire as b = 6356,912 km; afplatting $\frac{a-b}{a} = \frac{1}{298,3}$. Ten opzichte daarvan vertoont het werkelijke oppervlak allerlei kleine afwijkingen, die aangetoond zijn door nauwkeurige analyse van de banen der kunstmanen. De versnelling van de

zwaartekracht bedraagt aan de equator 978,05 cm/sec^2, aan de pool 983,22 cm/sec^2. De aarde beschrijft haar baan om de zon in een jaar en draait om haar as in een dag. Uiterst nauwkeurige metingen hebben aangetoond dat de aarde voortdurend langzamer om haar as draait en dat de dag gemiddeld 0,001 sec per eeuw langer wordt; daarnaast zijn er ook zeer kleine jaarlijkse en onregelmatige veranderingen.

I.3.2 *Het inwendige*

Het inwendige van de aarde wordt bestudeerd door het onderzoek van de aardbevingen; deze veroorzaken elastische golven die zich dwars door het gehele aardlichaam uitbreiden. De aardkorst strekt zich tot een diepte van 10 tot 60 km uit. Daaronder bevindt zich de mantel, die ook uit silicaten bestaat, maar vermoedelijk een toenemend ijzer- en magnesiumgehalte vertoont naarmate men dieper komt. Op 2900 km onder het aardoppervlak begint de kern, die vloeibaar is, en waarin zich nog van 4900 km tot het centrum een vaste binnenkern bevindt. Meestal wordt aangenomen dat de kern uit gesmolten ijzer-nikkel bestaat, met geringe bijmengsels. Anderen vermoeden dat de kern, althans de buitenkern, uit dezelfde silicaten bestaat als de mantel, maar dat ze bij de daar heersende enorme druk in een metallische toestand zijn overgegaan. Wervels in de kern zijn de oorzaak van het aardmagnetisme.

I.3.3 *De dampkring*

Om de aarde heeft zich een dampkring gevormd, door geleidelijke ontgassing van de gesteenten. Aanvankelijk bevatte hij vrijwel geen zuurstof; deze is pas ontstaan, toen plantengroei de aarde overdekte en door assimilatie het kooldioxyde splitste. Thans bestaat de dampkring uit: 75,523% stikstof; 23,15% zuurstof; 1,290% argon; 0,050% kooldioxyde;

Plaat 1 De maan, tien dagen oud.

Plaat 2 De maan, achttien dagen oud. Plaat 1 en plaat 2 geven samen een volledig beeld van de maanoppervlakte.

Plaat 3 Apennijnengebergte op de maan. Ongeveer in het midden de walvlakte Archimedes; rechts de vlakte Mare Imbrium; rechtsboven de krater Eratosthenes, die ook op plaat 4 te zien is; linksonder een alleenstaande piek met lange schaduwen.

Plaat 4 De krater Copernicus op de maan. Rondom de krater is een uitgebreid stralenstelsel te zien; links een aantal kleine kraters op een rij; nog verder naar links de krater Eratosthenes, die ook op plaat 3 staat.

een veranderlijke hoeveelheid waterdamp; en verder kleine hoeveelheden ozon, edelgassen, waterstof, enzovoort. In de meteorologie neemt men als normale luchtdruk de bar = 1000 millibar, overeenkomend met de druk van een kwikzuil van 750 mm. Stijgt men over $H = 8$ km, dan zou de luchtdruk veranderen in de verhouding $1 : e = 1 : 2{,}72$, indien de temperatuur en de vochtigheidsgraad constant bleven. H is de schaalhoogte.

Naarmate men hoger stijgt wordt de dampkring ijler en ijler. De moleculen worden meer en meer gesplitst in atomen en in ionen + elektronen. De gassen worden niet meer dooreengeroerd, maar beginnen zich te rangschikken naar hun moleculegewicht. Boven de 1000 km is nog door de remming die de kunstmanen daar ondervinden een spoor aantoonbaar van de dampkring, die dan geleidelijk in de interplanetaire ruimte overgaat. Boven de 2000 km overheersen helium en tenslotte waterstof. Raketten hebben aangetoond, dat deze zogenoemde 'geocorona' van atomaire waterstof oplicht in de zonnestralen en door resonantie de spectrale lijn Lyα uitzendt. De temperatuur van de dampkring, die op 95 km hoogte nog —100° was, stijgt belangrijk naarmate we hoger komen en wordt constant boven een bepaalde thermopauze. Bij deze hoge lagen veroorzaakt het verschil tussen dag en nacht een enorme uitzetting of inkrimping, verder hangt de temperatuur ook sterk af van de ver-ultraviolette zonnestraling, dus van de ogenblikkelijke zonsactiviteit. 's Nachts, bij rustige zon, is de temperatuur boven de 220 km ongeveer 425° C; overdag, bij zeer actieve zon, bereikt die 1700° boven de 400 km.

I.3.4 *De omgeving van de aarde*

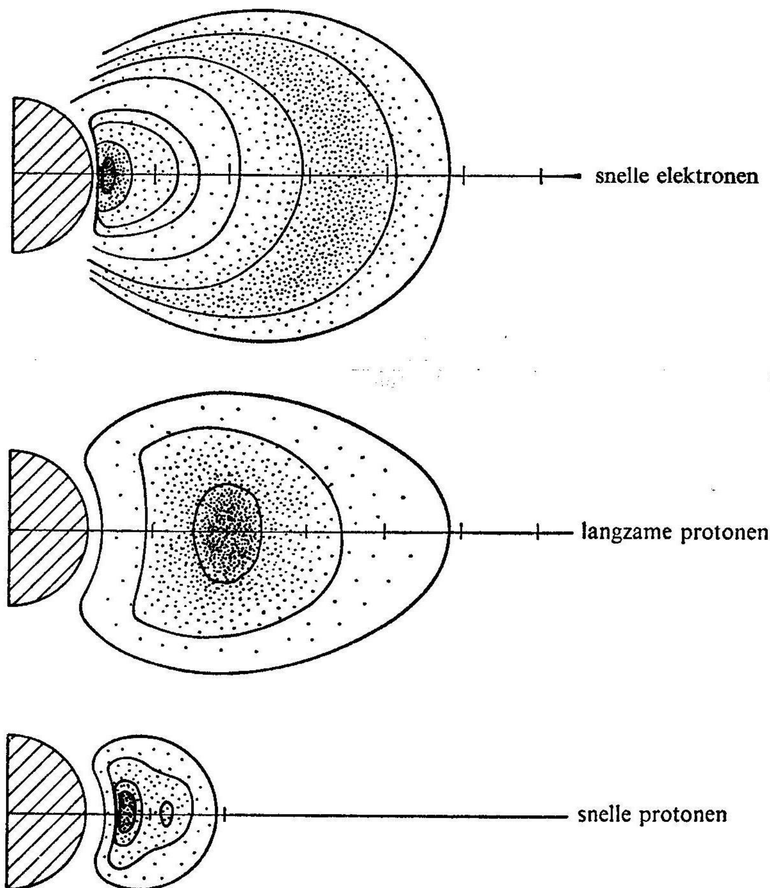
Op hoogten van 10 000 tot 100 000 km komen af en toe uiterst ijle, geïoniseerde gaswolken voor, die tot het verschijnsel van de 'whistlers' (fluittoontjes) aanleiding geven. Van een sterke blikseminslag gaan namelijk radiogolven uit, waarvan de langste zich van het ene naar het

---

Plaat 5 Teruggeprojecteerd gedeelte van het maansbeeld. Een foto van de maan wordt op een bol geprojecteerd en kan nu *onverkort* worden opgenomen. Centraal: de krater Tycho; men ziet de kraterstralen als rechte lijnen. Naar: G. P. Kuiper, Lunar and Planetary Laboratory, Tucson.

Plaat 6 Het maanoppervlak van dichtbij. Opname Ranger VII; hoogte 6 km boven het oppervlak, twee seconden vóór inslag. Afstand tussen de merktekens 650 meter; details van 5 meter zijn nog zichtbaar. Let op het rotsblok in de krater links. NASA en JPL, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena.

andere halfrond voortplanten en daar teruggekaatst worden, zodat ze verscheidene malen langs een magnetische meridiaan heen en weer lopen. In een radiotoestel wordt een kort fluittoontje waargenomen, dat zich met intervallen van enkele seconden herhalen kan. We besluiten hieruit, dat de wolken geïoniseerd gas zich langs de magnetische krachtlijnen van de aarde uitstrekken, waardoor zij vastgehouden worden op dezelfde wijze als dit in de deeltjesgordels geschiedt (zie verder). Dit plasma heeft



Afb. 16 De 'deeltjesgordels'. Verdeling van elektronen en protonen in de omgeving van de aarde. De eenheden van de schaal komen overeen met aardstralen.

een zeer hoge brekingsindex voor de lange golven, die aldus langs de buisvormig gestructureerde gasslierten worden geleid.

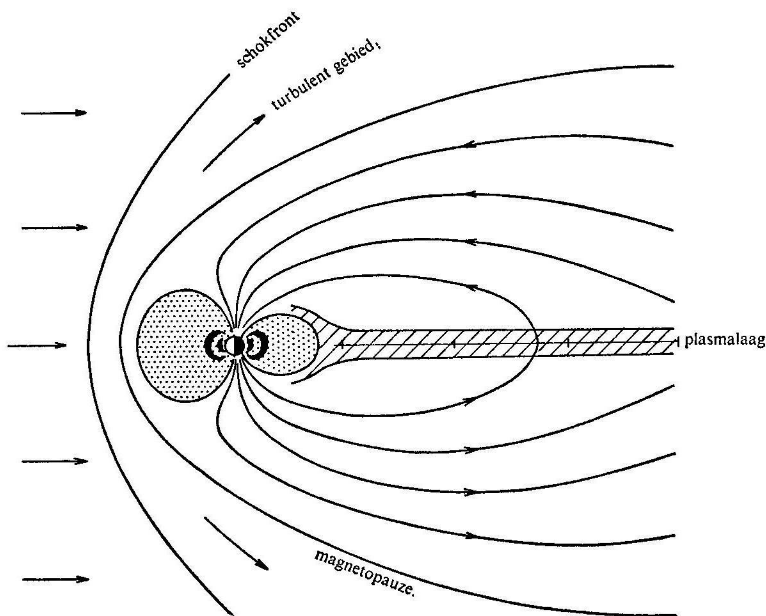
Op grotere afstand van de aarde zijn in 1957-1958 gordels van energierijke, geladen deeltjes ontdekt, die gevangen zijn in het aardmagnetische veld, en die als servetringen onze planeet omsluiten (afb. 16). Ze zijn genoemd naar Van Allen, die hun bestaan afleidde uit de registreringen van de ruimteschepen; men spreekt dikwijls van 'stralinggordels'. Het gebied waarin geladen deeltjes stabiel kunnen worden vastgehouden, strekt zich in de richting naar de zon uit tot ongeveer 10 aardstralen van het centrum. De verdeling van de elektronen en protonen over die ruimte verschilt al naar gelang van hun energie. Tot 1,7 aardstralen spreekt men van 'de binnenste gordel', het gebied daarbuiten noemt men 'de buitenste gordel'. Er komen elektronen voor met energieën tot meer dan 1 MeV, protonen tot meer dan 100 MeV, overeenkomend met snelheden van meer dan 100 000 km/sec tot bijna lichtsnelheid. Slechts een klein gedeelte van de daar aanwezige elektronen en protonen heeft deze grote snelheden. Ten gevolge van de Lorentz-kracht gaan de geladen deeltjes schroeflijnen beschrijven om de krachtlijnen van het aardmagnetische veld. Naarmate ze een van de polen naderen en de veldsterkte toeneemt, worden de windingen van die schroeflijn steiler, de component van de beweging langs de krachtlijnen keert van teken om en de beweging wordt gespiegeld: het deeltje beweegt nu naar de andere pool toe. De geladen deeltjes zijn dus gevangen in het aardmagnetische veld. Vermoedelijk ontstaan de snelle deeltjes van de binnengordel doordat deeltjes van de kosmische straling op atoomkernen van onze buitenste dampkring treffen: de vrijkomende neutronen verspreiden zich, bereiken het gebied van de binnengordel en vallen tegen die tijd uiteen in energierijke protonen en elektronen. De buitengordel is zeer veranderlijk van samenstelling, afhankelijk van de zonsactiviteit; aannemend dat deze deeltjes van de zon afkomstig zijn, blijft nog te begrijpen hoe zij aan hun hoge energie komen!

I.3.5 *De magnetosfeer*

Met ruimteraketten is de loop van het magnetische krachtveld tot op grote afstand van de aarde verkend. Dit veld is asymmetrisch vervormd door de zonnewind (afb. 17), die er omheen spoelt en het tot een magnetosfeer samendringt. Waar de magnetische druk moet wijken voor de kinetische energie van de zonnewind, ontstaat een schokfront met een turbulent overgangsgebied; dit is het geval op 10-13 aardstralen afstand. Aan de tegenovergestelde kant strekt zich de magnetosfeer als een soort 'kielzog' uit over honderden aardstralen of wellicht zelfs verder. In de

as van deze geomagnetische staart is er een lintvormige plasmalaag van enkele aardstralen breedte; daaromheen vinden we verspreide wolkjes energierijke elektronen.

Het poollicht is een lichtverschijnsel in de hoge dampkring, waargenomen op hogere breedten in het noordelijke en zuidelijke halfrond, het veelvuldigst in de poollichtgordels, op 20-25° van de geomagnetische polen. Ook in Nederland is het enkele malen per jaar te zien, namelijk in perioden van sterke zonsactiviteit. Het speelt zich meestal af op een hoogte van 110 km. De gasatomen worden tot lichten gebracht door de aanslag van zeer snelle elektronen, terwijl toch ook protonen voorkomen. Het verband met de storingen op de zon is zo duidelijk, dat men de oorsprong van dit plasma wel in de zon moet zoeken. Het toestromen van de snelle deeltjes bij poollicht blijkt nauw samen te gaan met de aanvulling van de buitenste Van Allen-gordel. Hoe het zonneplasma ons bereikt, niettegenstaande de magnetische afscherming van de aarde, en hoe het zijn hoge energie verkrijgt, was lange tijd een raadsel. Men weet thans dat het binnenstroomt via de geomagnetische staart van de aarde.



Afb. 17 De magnetosfeer van de aarde. Een eenheid van de schaal komt overeen met tien aardstralen.

I.4 DE MAAN

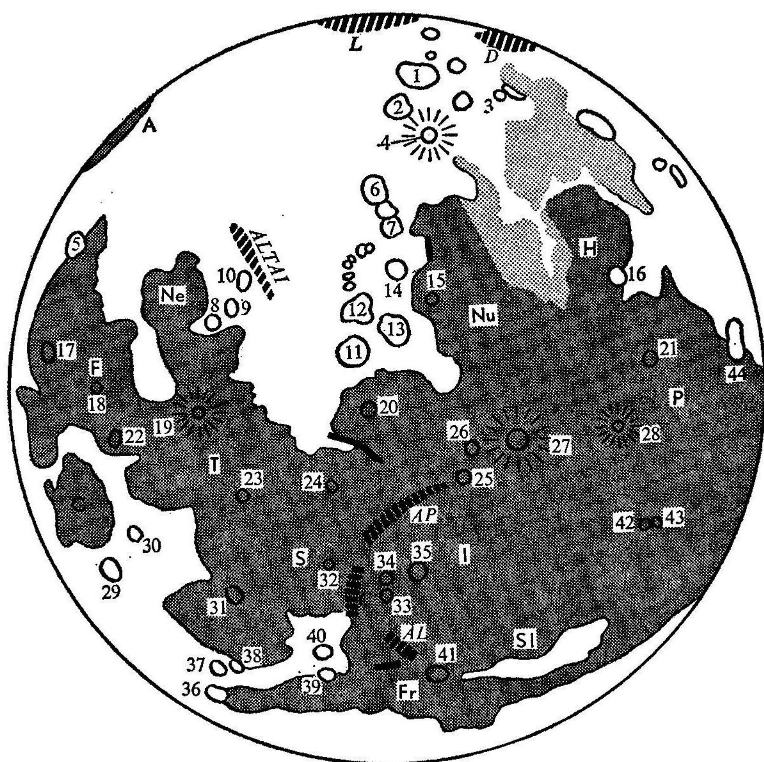
I.4.1 *Baan en libraties*

Van alle hemellichamen is de maan (afb. 18) het enige dat met volkomen zekerheid en tot in de fijnste bijzonderheden kan worden onderzocht. Alle verschillende astrofysische onderzoekingsmethoden die wij hebben opgesomd, worden bij deze studie gebruikt.

De afstand van de aarde tot de maan bedraagt gemiddeld 384 402 km, dus slechts 30 aardmiddellijnen; hij varieert tussen 356 000 en 406 000 km. Wij zien de maandiameter onder een hoek van gemiddeld 31′26″. De werkelijke middellijn bedraagt dus 3476 km; geen andere planeet heeft een naar verhouding zo grote satelliet. Uit de storing, door de maan uitgeoefend op de ruimteschepen Mariner-2, Mariner-4 en op de Rangers 6-9, volgt dat de massa van de maan 81,303 maal zo klein is als de massa van de aarde. Het soortelijk gewicht, dat 3,34 bedraagt, komt vrijwel overeen met dat van de buitenste delen van de aarde. De zwaartekracht aan het oppervlak is 0,166 maal die op aarde.

In de loop van 27,32166 dagen beschrijft de maan een omloop om de aarde. De baan is lichtelijk elliptisch, het baanvlak helt 5°,1 op de ecliptica. Ten gevolge van de aantrekking van de zon draait dit baanvlak langzaam, steeds dezelfde helling behoudend, om een as loodrecht op de ecliptica. De punten K en K′, waar de baan de ecliptica doorsnijdt (zie afb. 6 in deel 2, I.1.5) en die men de knopen noemt, verplaatsen zich daarbij teruglopend langs de ecliptica en leggen een cirkelomtrek af in 18,5995 jaar (gemiddeld). De nauwkeurige vorm van de maanbaan is uitermate ingewikkeld vanwege de talloze storingen die erop inwerken. Brown heeft deze beschreven met een formule die uit 655 periodieke termen bestaat voor de lengte en uit half zoveel termen voor de breedte. De omloopstijd van de maan is 's winters langer dan 's zomers (jaarlijkse ongelijkheid); de snelheid in de baan vertoont niet alleen een maandelijkse periode, wegens de ellipticiteit, maar ook een halfmaandelijkse periode (variatie); de grote as van de baan draait afwisselend vooruit en een weinig achteruit, terwijl ook de excentriciteit afwisselend groter en kleiner wordt (evectie); de omloopstijd neemt geleidelijk af gedurende de eerstvolgende 25 000 jaar (seculaire versnelling).

Doordat de maan haar licht krijgt van de zon, is altijd slechts de helft van het maanoppervlak verlicht; al naar gelang de positie van de aarde, zien wij deze verlichte halve bol minder of meer verkort: de maan vertoont schijngestalten of fasen. Elke schijngestalte is aan de ene zijde begrensd door een cirkelboog; aan de andere, waar licht en schaduw



Afb. 18 Overzichtskaart van de maan. Dit is het beeld, zoals men het in de kijker ziet, ondersteboven ten opzichte van de waarneming met het oog. C = Mare Crisium; F = Mare Fecunditatis; T = Mare Tranquillitatis; S = Mare Serenitatis; Fr = Mare Frigoris; I = Mare Imbrium; SI = Sinus Iridum; P = Oceanus Procellarum; H = Mare Humorum; Nu = Mare Nubium; Ne = Mare Nectaris; A = Mare Australe; *C* = Kaukasusgebergte; *L* = Leibniz-gebergte; *D* = Dörfel-gebergte; *AP* = Apennijnen; *AL* = Alpen; 1 = Clavius; 2 = Maginus; 3 = Schiller; 4 = Tycho; 5 = Petavius; 6 = Walter; 7 = Purbach; 8 = Theophilus; 9 = Cyrillus; 10 = Catharina; 11 = Hipparchus; 12 = Albategnius; 13 = Ptolemaeus; 14 = Arzachel; 15 = Alphonsus; 16 = Gassendi; 17 = Langrenus; 18 = Messier; 19 = Maskelyne; 20 = Triesnecker; 21 = Flamsteed; 22 = Taruntius; 23 = Plinius; 24 = Manilius; 25 = Eratosthenes; 26 = Stadius; 27 = Copernicus; 28 = Kepler; 29 = Cleomedes; 30 = Macrobius; 31 = Posidonius; 32 = Linné; 33 = Aristillus; 34 = Autolycus; 35 = Archimedes; 36 = Endymion; 37 = Atlas; 38 = Hercules; 39 = Aristoteles; 40 = Eudoxus; 41 = Plato; 42 = Aristarchus; 43 = Herodotus; 44 = Grimaldi.

plotseling in elkaar overgegaan, zien wij de grenslijn als een ellipsboog (terminator). De schijngestalten geven wij aan met EK, VM, LK, NM. Wij zeggen dat de maan 'voortdurend dezelfde zijde naar de aarde keert'. Juister gezegd: de maan draait om haar as in dezelfde tijd waarin zij haar baan om de aarde beschrijft. Dat dit inderdaad de goede formulering is, blijkt bij precieze waarneming: doordat de aswenteling eenparig geschiedt, terwijl de baanbeweging om de aarde lichtelijk elliptisch is, blijft het naar de aarde gekeerde punt niet geheel vast ten opzichte van het maanoppervlak, maar verplaatst het zich over een klein hoekje naar links of naar rechts. Eveneens verplaatst zich dit punt een weinig naar boven of naar beneden, blijkbaar omdat de draaiingsas niet precies loodrecht staat op het baanvlak (men noemt dit: libratie in lengte, respectievelijk in breedte). Ook moet rekening gehouden worden met het feit dat de waarnemer zich in de loop van het etmaal verplaatst, ten gevolge van de aswenteling van de aarde, en dat hij daardoor nu eens rechts, dan weer links een weinig 'om de hoek' kan kijken (dagelijkse libratie). Tenslotte is er de echte fysische libratie: de maan is niet afgeplat zoals de aarde, misschien een weinig langwerpig (langste diameter naar de aarde gericht) of waarschijnlijker ietwat onregelmatig van de zuivere bol afwijkend: daardoor zwaait zij telkens een weinig heen en weer om haar gemiddelde stand. Door de samenwerking van deze verschillende bewegingen slagen wij erin, tot 59 percent van het maanoppervlak waar te nemen.

1.4.2 *Dampkring*

Van dampkring is er geen spoor. *1* De oppervlaktevormen zijn ragscherp tot vlak bij de rand, er is geen verstrooiing. *2* Als de maan toevallig vóór een ster schuift (sterbedekking), verdwijnt deze plotseling zonder plaatsverandering; er is dus geen refractie. *3* Bij EK of bij LK zijn de donkere partijen vlak nabij de terminator volkomen donker; als er een dampkring was, zou die het licht een weinig verstrooien.

Deze en andere methoden die nauwkeurig genoeg zijn om een duizendmiljoenste van de aardse dampkring aan te tonen, hebben geen spoor van gasomhulling op de maan verraden. Alleen door het waarnemen van verre radiobronnen die soms door de maan bedekt worden, is er een uiterst geringe straalkromming nabij de maansrand gevonden; de dampkring zou ijler zijn dan een biljoenste (10^{-12}) van de aardatmosfeer. Men neemt aan dat hij bestaat uit krypton en xenon, wellicht radioactief gevormd in het gesteente, en uit uitgewasemde vulkanische gassen die zich snel verspreiden in de ruimte.

De afwezigheid van een dampkring is te verklaren door de geringe massa van de maan: de kritische snelheid is zo klein, dat alle moleculen

ontsnapt moeten zijn. Daar er geen dampkring is, is er ook geen water. Wel is het denkbaar dat er een ijsmantel op enige diepte aanwezig is, waar de temperatuur bestendig onder het nulpunt ligt.

1.4.3 *Oppervlaktevormen*

Op de platen 2, 3 en 4 is de AFNEMENDE maan afgebeeld (denk aan de omkering door de kijker!); op plaat 1 is de WASSENDE maan afgebeeld.

Reeds met de eenvoudigste veldkijker kan men verrassend aardige details zien, vooral nabij het eerste kwartier. Waarneming met een sterk instrument vertoont de vormingen ragscherp en in volle pracht. Objecten van ongeveer 500 meter zijn reeds zichtbaar. De vlakten (ook wel maria genoemd) zijn opvallend donker; zij worden met het ongewapend oog als vlekken waargenomen. Zij beslaan ruim 35 percent van het oppervlak en moeten wel opgevat worden als gestolde lavazeeën. De berglanden (Continentes) zijn helder; de typische bergketens bestaan uit afzonderlijke bergen zonder gemeenschappelijke plooiingsrichting, zeer wild, doordat er geen erosie heeft plaatsgevonden. Over het gehele oppervlak ziet men kleinere en grotere cirkelvormige kraters van zeer verschillende afmetingen: meer dan 300 000 van deze vormingen groter dan 1 km zijn van op aarde waargenomen; de grootste noemt men soms walvlakten (van 100 tot 235 km).

Omtrent de oorsprong van de kraters staan vanouds twee theorieën tegenover elkaar. *1* Vulkanisme, waarvan misschien nog een enkele uitwerking valt waar te nemen. *2* Inslag van meteorieten, die met volle snelheid neerkomen, door de plotselinge remming tot gas verhit worden en ontploffen. Voor de stralenkraters denkt men aan inslag van kometen; voor grote, ronde vlakten als M. Imbrium aan inslag van planetoïden. Ook op aarde kent men meteoorkraters; dat er niet meer dan een 150-tal bekend zijn, verklaart men door de dampkring, die de meteorieten remt, en door de erosie die de gevormde kraters reeds na 10 000 jaar zal uitwissen. De meesten geloven nu, dat beide werkingen een rol hebben gespeeld. Vulkanisch zijn bijvoorbeeld de rijen kratertjes langs kloven, en de kleine lage aanzwellingen die soms een kratertje op de top dragen ('koepelbergen'). In november 1959 heeft Kozyrew waargenomen hoe de krater Alphonsus een lichtschijnsel vertoonde en hoe gassen daaruit ontsnapten; later zijn dergelijke waarnemingen ook door Amerikaanse astronomen gedaan.

Vele kraters, vooral de grote, hebben in het centrum een verhevenheid. Dikwijls is de bodem van de krater lager dan de omringende vlakte, en wel zóveel, dat de totale uitholling ongeveer dezelfde inhoud heeft als de opgeworpen wal: deze bestaat dus uit materie die van de kraterholte

afkomstig is. Kraters die aan een vlakte grenzen, zijn aan die kant dikwijls half bedolven onder de donkere massa die eenmaal, taaivloeibaar, de vlakten heeft gevormd. Van verscheidene grote kraters gaan kraterstralen uit, die zich soms over ontzaglijke afstanden uitstrekken: vermoedelijk zijn dit sporen van uitgeworpen materiaal; ze verheffen zich niet boven de omgeving (zie plaat 4 en plaat 5). Om de grote kraters zijn er aantallen kleine, secundaire kraters, te verklaren door de inslag van rotsblokken, uitgeworpen door de centrale krater. De stralenkraters zijn waarschijnlijk jonge vormingen: het heldere materiaal van de stralenkransen om de kraters zou door inwerking van de zonnewind donker gekleurd en onzichtbaar worden (zie ook deel 2, I.5.3). Hier en daar lopen kloven over het maanoppervlak, blijkbaar ontstaan door krimpen van de korst; ze zijn ongeveer 1000 m breed en 200 m diep; er zijn er meer dan duizend. De beroemde Rechte Muur is een breuktrede, 112 km lang, en vertoont een hoogteverschil van een paar honderd meter tussen beide randen. De Alpenvallei, 150 km lang, lijkt een soort goot, in het oppervlak uitgegraven.

Van de randgebergten kunnen wij het profiel vrij zuiver waarnemen en fotograferen. Verder kan men de hoogten van de bergen ten opzichte van hun omgeving bepalen door de schaduw te meten, die ze werpen op de naburige terreinen (plaat 3); het blijkt dat de gebergten zelden meer dan 6000 m hoog zijn. Veel moeilijker is de absolute hoogtebepaling: hiertoe maakt men gebruik van de onderlinge verschuivingen die hoge en lage punten ondergaan door de libratiebewegingen van de maan. Herhaaldelijk werd beweerd, dat men veranderingen in de vormen van het maanoppervlak had waargenomen; geen van deze beweringen is echter voldoende gefundeerd. In grote gebieden van het oppervlak is er een voorkeur voor bepaalde richtingen, volgens welke de heuvelrijen en de kloven verlopen en de kraters uitgerekt zijn (selenografisch net).

De beschrijving van de oppervlaktevormen van de maan heet selenografie. Er bestaan uitstekende kaarten die alle details van de maan vertonen, voorzien van de kenmerkende namen. Zeer waardevolle atlassen van de maan zijn onlangs uitgegeven door G. P. Kuiper (Tucson). Onder andere heeft deze onderzoeker met zijn medewerkers de foto's van de randgedeelten op een bol geprojecteerd, zodat de perspectivische verkorting wordt opgeheven en de oppervlaktevormen in hun ware gedaante worden gezien (zie plaat 5). Thans wordt een kaart op de schaal van $1 : 10^6$ vervaardigd, door samenwerking van een aantal instituten. Van bepaalde delen maakt men detailkaarten op nog veel groter schaal, tot 1 : 1000 toe, gebruikmakend van de rijke voorraad opnamen, door de Rangers en de Orbiters verkregen.

Kuiper en Arthur hebben een catalogus gepubliceerd van 4510 vaste punten waarvan de coördinaten met een nauwkeurigheid van 1 km zijn aangegeven; ook de nomenclatuur is daarin sterk verbeterd. Een proeve van selenologische kaart laat de vermoedelijke ouderdom van de verschillende vormingen zien.

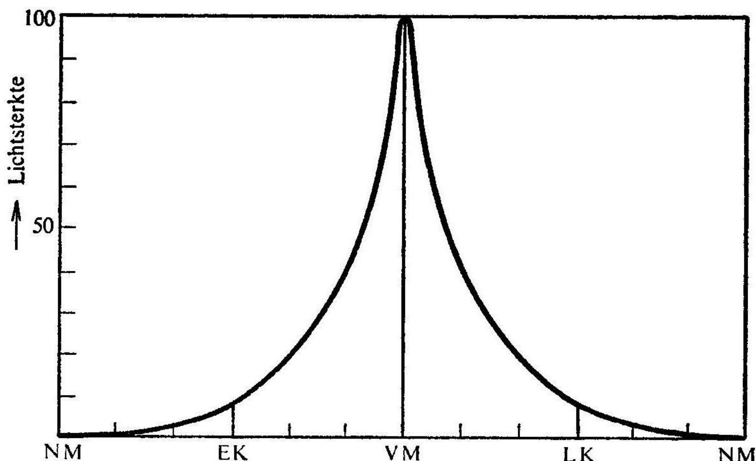
Op de beste van de aarde uit genomen foto's waren details van 600 meter grootte nog te onderscheiden. Een belangrijke vooruitgang werd bereikt door de ruimteschepen Ranger VII, Ranger VIII en Ranger IX, die op de maan neerkwamen en die in het laatste kwartier van hun baan duizenden opnamen maakten op geleidelijk afnemende afstand (in totaal 17 700 foto's). Op de laatste daarvan zijn nog details van de orde van 30 cm zichtbaar. Juist bij die laatste opnamen verandert het karakter van de oppervlaktestructuur, de randen van de kleine kratertjes (< 250 m) zijn niet opgehoogd, en ook niet scherp maar afgerond; vermoedelijk hebben we te maken met glooiende inzakkingskraters van een zeer poreuze oppervlaktelaag (plaat 6).

Tenslotte hebben de ruimteschepen Loena IX en XIII en de Surveyors 1-7, na een zachte landing, detailopnamen overgeseind, waarop men bijzonderheden van 1-2 millimeter kan onderscheiden. Het oppervlak is korrelig en overal met gruis en stenen bedekt (plaat 7). Het gemiddeld soortelijk gewicht wordt op 0,5 geschat. Een losse stoflaag, indien aanwezig, moet wel zeer dun zijn. De achterkant van de maan, nu door de opnamen van ruimteschepen voor het onderzoek toegankelijk gemaakt (plaat 8), vertoont opvallend weinig donkere vlakten. Wel zijn er kommen, ten hoogste 500 km groot, niet donker gekleurd, met kraters bedekt. Het aantal kraters per oppervlakte-eenheid is groter dan aan de voorkant; dikwijls zijn zij tot kraterrijen gerangschikt. Voor deze verschillen is nog geen afdoende verklaring gegeven.

1.4.4 *Fysisch onderzoek*

De helderheid van het maanlicht neemt verrassend snel toe nabij het ogenblik van de volle maan (oppositie-effect) en neemt daarna even snel af. Bij EK of LK is de lichtsterkte niet de helft, maar een negende of een tiende van die bij volle maan (zie afb. 19)!

Het helderheidsmaximum van de VM treedt voor alle punten van het oppervlak gelijktijdig op, zowel voor de randpartijen als voor het centrum en zowel voor de berglanden als voor de vlakten. Dit bewijst dat het gehele oppervlak sterk poreus moet zijn, bedekt met kuiltjes die zo klein zijn, dat onze kijkers ze niet kunnen waarnemen; of bestaande uit zeer los poeder; of opgebouwd uit vezelige structuren met veel tussenruimten. Bij VM zijn alle voor onze blik toegankelijke delen verlicht, omdat wij



Afb. 19 Lichtsterkte van de maan bij verschillende schijngestalten.

waarnemen van dezelfde richting uit, waarin de zonnestralen invallen. Daarvóór of daarna zien wij echter al onmiddellijk veel beschaduwde vlakjes. De gemiddelde albedo van de maan is zeer gering (0,07) en vergelijkbaar met die van de donkerste aardse gesteenten; zij is echter verschillend van plaats tot plaats. Het bestanddeel van de donkerste partijen (vlakten) heeft men lunabasiet genoemd; dat van de helderste partijen: lunariet. Waarschijnlijk verkleurt het lunariet onder invloed van de protonen van de zonnewind (zie deel 2, I.5.3), zoals men dit in het laboratorium aan gesteenten waarneemt: op grond van deze proeven zou ongeveer één miljoen jaren voor die verkleuring nodig zijn.

De delen van de maan, die niet door de zon verlicht worden, zijn toch niet volkomen donker. Hun zwakke lichtschijn die het best zichtbaar is nabij NM, wordt het asgrauwe licht genoemd. De lichtbron die dit schijnsel teweegbrengt, is de aarde die op dat ogenblik vol verlicht is. De fotometrie van het asgrauwe licht geeft ons de albedo van de aarde (0,39).

In het algemeen is de maan een weinig bruinachtig; de kleurverschillen zijn gering, maar onmiskenbaar. Uit de fotoëlektrische waarnemingen vindt men, dat de vlakten verschillende, door scherpe grenzen gescheiden kleurgebieden vertonen, die men verklaart als opeenvolgende lavavloeden. Er zijn enkele gebieden die in het infrarood of ultraviolet donkerder of lichter zijn; bijzonder interessant is de vlek die Wood ontdekte nabij de krater Aristarchus (afb. 18, nr. 42) en die in ultraviolette opnamen op-

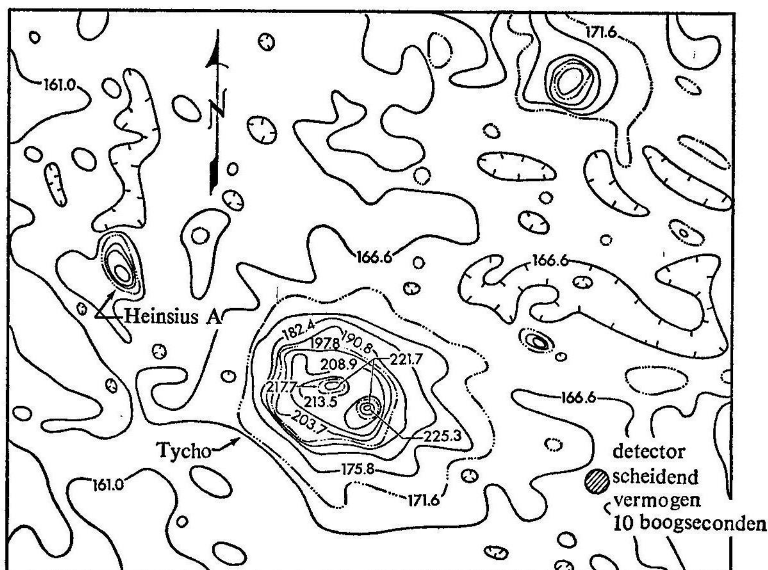
vallend donker is. Hij veronderstelde, dat dit wijst op een zwavelaanslag, daar zwavel een dergelijk optisch gedrag vertoont. De straling in het verre infrarood is goed meetbaar en heeft haar maximum nabij $\lambda = 8\mu$. Op de hierboven aangegeven wijze kan men uit deze stralingsmetingen de temperatuur van het oppervlak vinden (zie deel 2, I.2.5). Het blijkt dat die in de bestraalde gedeelten oploopt tot 125° C en in de schaduw daalt tot —170° C. Bij een maansverduistering valt de temperatuur in de loop van anderhalf uur over wel 200°, en even snel verwarmt zich daarna het oppervlak weer. Ook dit bewijst, dat de maan uit poreuze, slecht geleidende gesteenten bestaat. Stoffen die de warmte zo slecht geleiden, zijn bijvoorbeeld poeders in het luchtledige.

De straling van de maan is ook in het gebied van de korte radiogolven gemeten. De temperaturen die men vindt, zijn ongeveer het gemiddelde van de bepalingen uit het infrarood, maar men vindt geen verandering gedurende eclipsen en (voor golflengten boven de 10 cm) geen maandelijkse schommeling: blijkbaar vinden de temperatuurwisselingen alleen plaats in de allerbovenste laag die slechts enkele cm of mm dik is; de radiogolven echter komen gemiddeld uit een diepte van ongeveer 10 maal de golflengte.

In de laatste tijd heeft men met grote nauwkeurigheid kleine temperatuurverschillen kunnen meten, die plaatselijk aan het oppervlak van de maan voorkomen (afb. 20). Zo blijven bijvoorbeeld de stralenkraters steeds warmer dan hun omgeving, als de temperatuur na zonsondergang of bij een eclips daalt; dit wijst op anomalieën in soortelijk gewicht, geleidingsvermogen of korreligheid; anderen nemen aan dat de poreuze bovenlaag daar dunner is. Honderden 'hete plekken' zijn bekend geworden. Op zulke plaatsen vindt men ook afwijkingen in de radiohelderheid, in de polarisatie en een sterkere terugkaatsing van de radargolven.

Het maanoppervlak schijnt te fluoresceren; wanneer het door ultraviolette stralen of door protonen wordt getroffen, zendt het zwak zichtbaar licht uit, dat zich bij het teruggekaatste zonlicht voegt. Ook is er een aantal gevallen bekend waarin plaatselijk een kortstondig oplichten is waargenomen: dit zou te wijten kunnen zijn aan vrijkomend gas of aan bundels corpusculaire stralen van de zon.

Radarflitsen worden door de voorkant van de maan teruggekaatst bijna als door een spiegel. Door verstrooiing aan hobbels op de verder verwijderde delen krijgt de terugkerende flits een zwakke, uitdempende staart; hoe korter de golflengte, des te sterker is deze diffuse component: de hobbels moeten afmetingen hebben van de orde van centimeters. Uit het reflexievermogen (7 percent) leidt men een diëlektrische constante af van 2 à 3, zoals men het kan verwachten van uiterst losse, poedervormige



Afb. 20 Plaatselijke temperatuurverschillen op de maan. Metingen bij een maansverduistering; de temperaturen zijn aangegeven op de absolute schaal (vriespunt = 273°). Naar Shorthill en Saari, Boeing Airplane Company, 1966.

gesteenten (holten 80 percent van het totale volume). De omgeving van de krater Tycho blijkt de radargolven uitzonderlijk goed terug te kaatsen.

Het licht van de maan is duidelijk gepolariseerd. Noem de intensiteit van de trillingen in het invalsvlak I_i en die loodrecht daarop I_e; de polarisatiegraad is dan $p = \frac{I_e - I_i}{I_e + I_i}$. In afb. 14 ziet men, hoe p als functie van de fasehoek a varieert; het is opvallend, hoe nauwkeurig men deze curve heeft kunnen meten. Een onderzoek van gesteenten op aarde leverde als resultaat, dat alleen poedervormige stoffen met zeer donkere korrels, bijvoorbeeld vulkanische as, een dergelijke kromme vertoonden; noch lava, noch andere gesteenten voldeden. De overeenstemming is vooral treffend, als dit stof eerst door een bundel protonen is bestraald (nabootsing van de zonnewind!).

Met raketten is de radioactiviteit gemeten van de maangesteenten; ook is nagegaan hoe alfadeeltjes verstrooid worden; uit beide waarnemingen

kan men in grote trekken de samenstelling bepalen. Het blijkt dat die ongeveer met die van basalt overeenkomt. Ook hebben raketten, na zachte landing, de hardheid van de bodem onderzocht, hetzij door indrukken of door het graven van een groefje: hij moet in stevigheid vergelijkbaar zijn met vochtig zand en zal een druk van enkele kg per cm^2 kunnen dragen, zodat men er zonder gevaar op staan kan.

Uit het geheel van de fotometrische, thermische, polarimetrische gegevens en uit de raketwaarnemingen tracht men zich een beeld van het maanoppervlak te vormen. Men is het erover eens dat het zeer poreus moet zijn. Sommigen denken aan fijne, donkere korrels, samengepakt tot een zeer onregelmatige massa; anderen aan sponsachtig gesteente, zoals vulkanische sintels of zoals lava die in het luchtledige stolt; anderen weer menen dat zulke poreuze gesteenten bedekt zijn met een dun stoflaagje – dit zou dan verklaren dat de kleur en polarisatie zo weinig van plaats tot plaats verschillen. Het stof zou ontstaan zijn door inslag van de ontelbare zeer kleine meteorieten en meteoroïden in de loop van de miljoenen jaren. Door bestraling met protonen worden dergelijke materialen donker gekleurd, ruwer, en krijgen eigenschappen die nog meer op het maanoppervlak gelijken. Voor een verder onderzoek van het maanoppervlak is de samenwerking van geologen, geomorfologen, natuurkundigen en sterrenkundigen noodzakelijk.

DE PLANETEN VAN HET ZONNESTELSEL

	Mercuri[…]
Symbool	☿
Afstand van de zon in A.E. = halve lange as van de baan	0,387
Omloopstijd	$87^d,97$
Excentriciteit van de baan	0,2063
Helling van de baan	7°,00
Gemiddelde diameter in aardmiddellijnen	0,38-0,3[…]
Massa in aardmassa's	0,054
S.G. (water = 1)	5,09-5,4[…]
Rotatietijd	59^d
Afplatting	0
Albedo	0,06

De astronomische eenheid (A.E.) = 149 598 000 km; gemiddelde diameter van de aarde: 12742,46 km; massa van de aarde: $5{,}975.10^{27}$ gram.

Raketten die om de maan cirkelen vertonen bepaalde storingen in hun beweging, die te verklaren zijn door knobbels van grotere dichtheid (masconen), op enige diepte onder de ronde vlakten.

Van een algemeen magneetveld hebben de raketmetingen niets kunnen aantonen. Dit moet daarmee samenhangen, dat de maan geen vloeibare kern bezit. In overeenstemming hiermee is ook, dat er om de maan geen gordels energierijke deeltjes zijn aangetroffen.

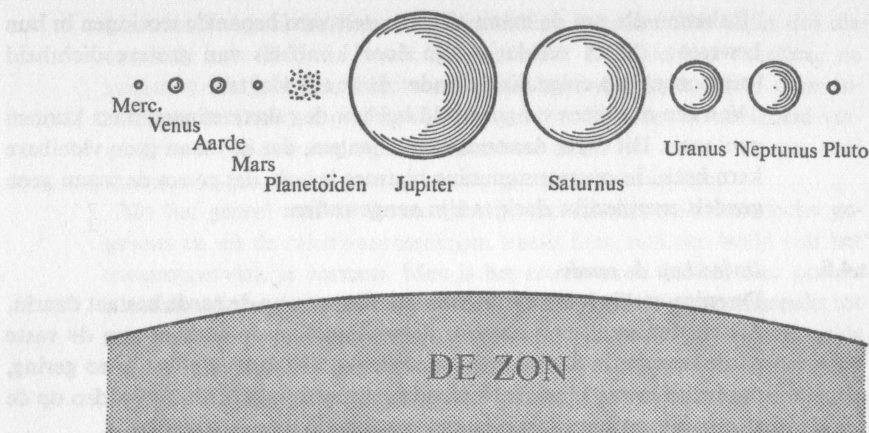
1.4.5 *Invloed op de aarde*

De enige, stellig bekende invloed van de maan op de aarde bestaat daarin, dat zij, te zamen met de zon, de getijden van de oceaan, van de vaste aarde en van de dampkring veroorzaakt. Dit laatste effect is zo gering, dat het geen merkbare invloed op het weer kan hebben. Invloeden op de stratosfeer en ionosfeer zijn niet met zekerheid vastgesteld.

1.5 BESCHRIJVING VAN DE PLANETEN AFZONDERLIJK

In onderstaande tabel vindt men een overzicht van de planeten van het zonnestelsel. Aan de planeten wordt vervolgens, in afzonderlijke paragrafen, een gedetailleerde bespreking gewijd.

Venus	*Aarde*	*Mars*	*Ceres*	*Jupiter*	*Saturnus*	*Uranus*	*Neptunus*	*Pluto*
♀	⊕	♂	⊙	♃	♄	♅	♆	♇
0,723	1,000	1,524	2,767	5,203	9,522	19,28	30,15	39,8
224^{d},70	1^{j},000	1^{j},881	4^{j},60	11^{j},86	29^{j},46	84^{j},01	164^{j},79	247^{j},7
0,0068	0,017	0,0933	0,076	0,0484	0,054	0,051	0,006	0,253
3°,39	0°,00	1°,85	10°,6	1°,31	2°,49	0°,77	1°,77	17°,14
0,95	1,00	0,53	0,06	10,84	9,17	3,72	3,38	0,90?
0,815	1,00	0,107	0,0001	318	95,1	14,5	17,2	?
5,16	5,52	4,09	3,3?	1,327	0,71	1,56	2,47	?
243^{d},1	24^{u}	24^{u},6	?	9^{u},9	10^{u},7	10^{u},8	15^{u},8	6^{u},4
0	1/298	1/85	?	1/15,3	1/10,2	1/18	1/58	?
0,71	0,39	0,16	0,06	0,73	0,69	0,93	0,84	0,14



Afb. 21 De diameters van de planeten.

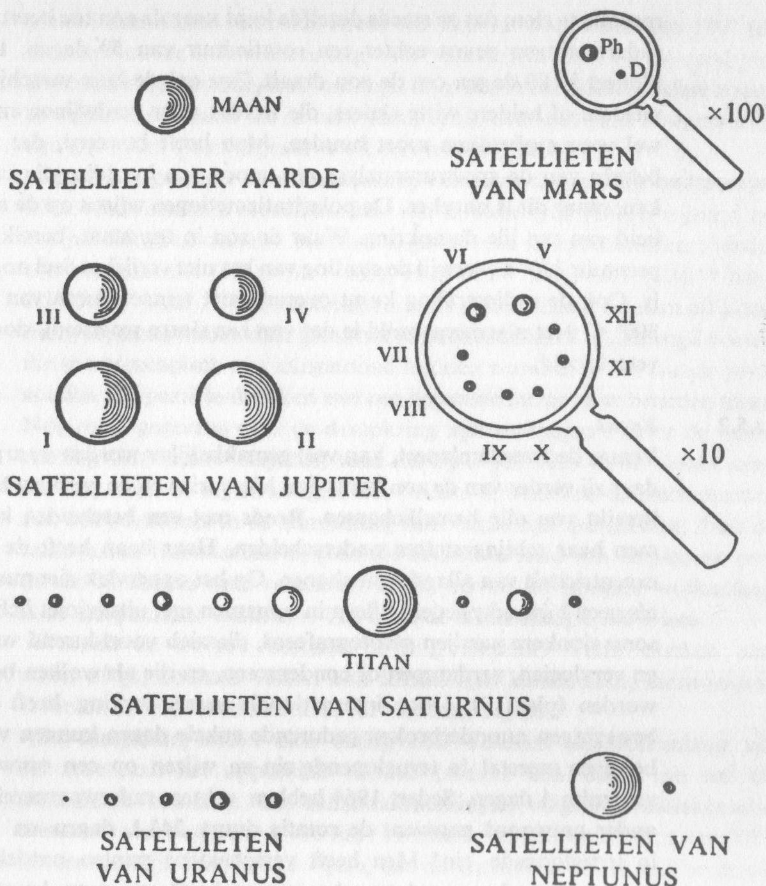
I.5.1 *Mercurius*

Mercurius is de planeet die zich het dichtst bij de zon bevindt. De ene maal zien wij haar links van de zon, dan is ze avondster; de andere maal rechts, dan is ze morgenster. Haar baan vertoont een grote helling (7°) en een grote excentriciteit ($e = 0{,}206$); de ellips als geheel draait langzaam in het baanvlak ('periheliumbeweging'). Zij is zeer helder, doordat de zon haar van zo nabij verlicht, maar dit valt weinig op tegenover de lichte ochtend- of avondhemel. Zij vertoont schijngestalten, zoals de maan. Haar albedo is gering en de helderheid neemt snel af na volle fase. Het lijkt dus waarschijnlijk, dat de planeet evenals de maan uit donkere, poreuze gesteenten bestaat. Op het oppervlak bemerkt men zwakke, onduidelijke details die men zelfs in kaart kon brengen en waaraan men

---

Plaat 7 Het maanoppervlak van zeer dichtbij. Opname Loena-9. Op de voorgrond zijn details van 1 à 2 millimeter nog waarneembaar te onderscheiden. Verder naar achter wordt de schaal snel kleiner; de steen linksboven is 15 centimeter groot. De verticale streep is ontstaan door een kleine hapering in het uitzenden van de signalen.

Plaat 8 De achterkant van de maan, naar opnamen van de Orbiters. Grote vlakten ontbreken, er is een aantal 'kommen'. Grote kraterdichtheid. Bewerking door ACIC.



Afb. 22 De diameters van de satellieten.

Plaat 9 Wolken op Venus, naar opnamen van verscheidene samenwerkende sterrenwachten, aaneengeschakeld te Meudon, zodat ononderbroken reeksen ontstaan.

Plaat 10 Mars. Van links naar rechts: 9 maart, 11 mei, 29 mei, 23 juni, 31 juli, 21 augustus (Mars-kalender). Men ziet: 1. het geleidelijk verdwijnen van de poolkap; 2. het verschijnen van donkere gebieden in de tropen (plantengroei?); 3. het verbleken van die gebieden tegen het einde van de zomer. Opname Slipher, Flagstaff.

meende te zien, dat ze steeds dezelfde kant naar de zon toe keert. Recente radarmetingen geven echter een rotatieduur van 59 dagen, terwijl de planeet in 88 dagen om de zon draait. Een enkele keer verschijnen vale vlekken of heldere witte sluiers, die weldra weer verdwijnen en die men wel voor stofwolken moet houden. Men heeft beweerd, dat men met behulp van de spectrumanalyse een spoor van kooldioxyde ontdekken kan, maar dit is onzeker. De polarisatiemetingen wijzen op de aanwezigheid van een ijle dampkring. Waar de zon in top staat, bereikt de temperatuur 300° C, terwijl de straling van het niet verlichte deel nog onzeker is. Ook de radiostraling komt overeen met temperaturen van ongeveer 300° C. Het algemene beeld is dat van een dorre woestenij, door de zon verschroeid.

1.5.2 *Venus*

Venus, de tweede planeet, kan veel gemakkelijker worden waargenomen, daar zij verder van de zon komt dan Mercurius en de grootste helderheid bereikt van alle hemellichamen. Reeds met een bescheiden kijker kan men haar schijngestalten onderscheiden. Haar baan heeft de geringste excentriciteit van alle planetenbanen. Op het oppervlak ziet men zo goed als geen bijzonderheden; alleen in opnamen met ultraviolet licht worden soms donkere partijen gefotografeerd, die zich voortdurend verplaatsen en vervloeien, verdampen of condenseren, en die als wolken beschouwd worden (plaat 9). Door internationale samenwerking heeft men hun bewegingen ononderbroken gedurende enkele dagen kunnen volgen; ze bewegen meestal in teruglopende zin en wijzen op een omwentelduur van ruim 4 dagen. Sedert 1964 hebben echter radarwaarnemingen een ander antwoord gegeven: de rotatie duurt 243,1 dagen en geschiedt in teruglopende zin! Men heeft verscheidene punten ontdekt die de radargolven abnormaal terugkaatsen en heeft een ruwe kaart van het oppervlak onder de wolken kunnen verkrijgen.
Infraroodmetingen geven de temperatuur van de wolkenlaag: —40° C. De radiogolven die daar doorheendringen, geven daarentegen de temperatuur van het vaste oppervlak: +300° C. In beide gevallen is het verschil tussen de dag- en de nachtzijde betrekkelijk gering. Het bestaan van een omhullende wolkenlaag wordt bevestigd door de grote albedo, de helderheid-fasekrommen (afb. 11) en de polarisatie-fasekrommen (afb. 14), geheel verschillend van die der gesteenten, en overeenkomend met die van nevels in het laboratorium (grootte van de deeltjes: 1,5μ). Deze wolken zweven natuurlijk in een dampkring, die boven de wolkenlaag uitkomt, lichtbreking en lichtverstrooiing veroorzakend. Als de

planeet een sikkel vertoont, strekt die zich uit over meer dan 180° ten gevolge van de lichtverstrooiing. Als Venus zich dicht bij de rand van de zonneschijf bevindt, is zij omringd door een verblindend heldere zoom, te wijten aan stralen die in haar dampkring over een paar boogminuten zijn gebroken ('verschijnsel van Lomonosow', 1761).

Spectroscopisch is de samenstelling van deze dampkring onderzocht. Men vindt sterke moleculebanden van kooldioxyde (CO_2), wijzend op een partiële druk van 0,1 bar, dus ongeveer een tiende atmosfeer; verder zijn aangetoond: CO (9.10^{-6} bar), H_2O (10^{-5} bar), HCl (6.10^{-8} bar), HF (5.10^{-10} bar). De dampkring zou dus in hoofdzaak bestaan uit kooldioxyde, tenzij indien daar grote hoeveelheden stikstof bijgemengd waren, die spectroscopisch niet aangetoond kunnen worden; in dat laatste geval zouden alle partiële drukken met een bepaalde factor naar beneden gaan. Nog meer gegevens over de dampkring zijn verkregen *1* door de waarneming van de ster Regulus, toen die op 7 juli 1959 door Venus werd bedekt; *2* uit de registreringen van Venera-4, waarvan de instrumenten aan een parachute in de dampkring van Venus zijn neergelaten; *3* uit de radioseinen van Mariner-5, toen die achter de rand van de planeet verdween en daarna weer verscheen. Dicht boven de hoogste wolkenlaag is de temperatuur wellicht —70° C en de schaalhoogte 5 à 7 km.

Waaruit de wolken bestaan, is nog onzeker. Velen denken aan water of ijs; anderen veeleer aan kristalletjes keukenzout, ammoniumchloride, of bepaalde silicaten, carbonaten, oxyden.

De dampkring strekt zich stellig ook beneden de wolkenlaag uit en moet aan het oppervlak van de planeet een druk van wel 60 atmosferen bereiken. Uit radarwaarnemingen volgt een diëlektrische constante van ongeveer 3. De daar heersende hoge temperatuur van 300° is vermoedelijk daaraan te wijten, dat de atmosfeer van kooldioxyde en waterdamp de planeetstraling slecht doorlaat: ten gevolge daarvan zou de temperatuur van het vaste oppervlak stijgen, zoals in een broeikas.

Evenals de aarde is Venus omringd door een ijle wolk van waterstof, die in het zonlicht $Ly\alpha$ uitzendt. De zonnewind, niet geremd door een magneetveld, drukt deze hoge dampkring in elkaar tot op 500 km boven het oppervlak, vormt een schokfront en stroomt om de planeet heen.

De ruimteschepen hebben bij Venus noch een magneetveld, noch corpusculaire gordels kunnen vinden. Toch moet zij, evenals de aarde, een vloeibare kern hebben. Voor het ontstaan van een magneetveld is blijkbaar ook een voldoende snelle rotatie vereist: die ontbreekt hier.

De baan van Mariner-2 heeft verder een zeer nauwkeurige waarde voor de massa van Venus gegeven: 0,81485 maal die van de aarde.

I.5.3 *Mars*

Mars (zie plaat 10) heeft een uitgesproken elliptische baan. De omloopstijd bedraagt 687 dagen. De omwenteltijd is uiterst nauwkeurig bepaald op 24 uur 37 minuten 22,6689 seconde, dus vrijwel die van de aarde. De equator helt 24°,9 op het baanvlak (aarde: 23°,5). Er zijn dus seizoenen zoals op aarde. Uit de storing, door Mars uitgeoefend op de baan van het ruimteschip Mariner-4, volgt met grote nauwkeurigheid dat de massa gelijk is aan 0,10745 maal de aardmassa. Bergen zijn optisch niet te bespeuren. Het oppervlak vertoont een steenrode kleur, vermoedelijk te wijten aan oxydatie van het ijzer in de bodem tot ijzeroxyde (limoniet of goethiet $Fe_2O_3.nH_2O$). Wellicht bestaat de bodem eigenlijk uit silicaten, maar met poedervormig limoniet overdekt; de korrels zouden 50μ groot zijn; de gehele zuurstof van de dampkring moet aldus verdwenen zijn. Verder tekenen er zich grijze partijen af, die door contrast blauwgroen lijken en die men zeer gedetailleerd in kaart heeft kunnen brengen (areografie; vergelijk plaat 11).

Om de polen bemerkt men witte poolkappen die zich in de winter uitbreiden en zich in de zomer samentrekken. Uit het absorptiespectrum in het infrarood heeft men met zekerheid kunnen aantonen, dat de witte substantie ijs in de vorm van rijp is. Aan de grootte van de poolkappen kan men nagaan, hoe streng de winter in elk bepaald marsjaar is. Naarmate de poolkappen zich in de lente samentrekken (het ijs sublimeert), ziet men de grijze gebieden donkerder worden, blijkbaar doordat de waterdamp zich over het oppervlak van de planeet verspreidt (35 km per dag); in de herfst verkleuren ze bruinachtig (plaat 10). Tegelijk verandert de polarisatie die verband houdt met de microscopische structuren van het oppervlak.

Sommige grijze gebieden veranderen van vorm en uitgestrektheid in de loop van de jaren. Al deze feiten schijnen wel op de aanwezigheid van plantengroei te wijzen, misschien van zeer primitieve planten! De grijze gebieden vertonen echter niet het absorptiespectrum van het ons bekende bladgroen. Zij bestaan uit korrels van ongeveer 0,2 mm; bij het donkerder worden neemt de korrelgrootte toe tot 0,4 mm. Sommigen verklaren de verschijnselen door werking van de wind, die het fijne stof verplaatst.

De zogenoemde 'kanalen' van Schiaparelli (1877), Pickering en Lowell worden door de grote kijkers opgelost in een mozaïek van onregelmatige vlekjes; de vroegere beschrijvingen moeten worden beschouwd als gezichtsbegoochelingen, te wijten aan de neiging van de waarnemers om rechte lijnen te zien in een onregelmatig gemarmerde achtergrond.

Op 14 juli 1965 heeft het ruimteschip Mariner-4 eenentwintig beelden

van het oppervlak van Mars verkregen, van een afstand van 10 000 km opgenomen. Het is gebleken dat het oppervlak talloze kleine en grote kraters vertoont, ongeveer zoals de maan (plaat 12). De kleine kraters zijn naar verhouding minder talrijk – een gevolg van erosie door temperatuurwisselingen. De vorming van deze kraters door inslag van meteorieten ware zeer begrijpelijk, aangezien de baan van Mars zich dicht bij de planetoïdengordel bevindt, waar de meteorieten ontstaan.

Evenals bij de maan is gebleken, dat radargolven vrijwel spiegelend worden teruggekaatst door het voorste, naar ons toe gekeerde stukje van het planeetoppervlak. Door vertraagde doppler-ontvangst zijn hoogteverschillen tot 12 km gevonden.

De donkere gebieden kaatsen de radargolven beter terug dan de heldere. Uit kleine verschuivingen van het ogenblik der terugkaatsing besluit men, dat het oppervlak hellingen vertoont, en berekent daaruit hoogteverschillen van verscheidene kilometers. De donkere gebieden zouden hoogvlakten zijn.

Er is geen magneetveld waargenomen en ook geen Van Allen-gordels, dus vermoedelijk heeft Mars geen vloeibare kern.

Af en toe ziet men hoe over een deel van het Marsoppervlak de details verdwijnen, alsof ze bedekt werden door nevels. Tegelijk treden storingen van de normale polarisatie op. Gele, roze of bruinachtige sluiers bedekken bepaalde gebieden tijdelijk, vooral in de equatoriale gebieden en als Mars zich in zijn baan dicht bij de zon bevindt en daardoor enige tientallen graden sterker verwarmd wordt; de optische eigenschappen van deze sluiers komen overeen met die van de woestijnen, het zijn wel opgewervelde limonietwolken. Daarnaast komen ook witte en blauwige wolken voor, vooral aan de rand waar het ochtend wordt; ze zijn wellicht toe te schrijven aan de condensatie van waterdamp tot fijne ijskristalletjes. Uit de verplaatsingen van de wolkengebieden moet men besluiten tot windsnelheden van 4 tot 10 meter per seconde. Het bestaan van een dampkring wordt bevestigd door het grote verschil tussen de opnamen in ultraviolet en blauw licht, die met een gelijkmatige sluier bedekt schijnen (Rayleigh-verstrooiing) en de opnamen in het infrarood, die alle contrasten en details vertonen. Deze vrijwel permanente blauwe sluier verdwijnt soms gedurende enkele dagen, vooral als Mars in oppositie waargenomen wordt ('blauwe opklaringen'). De poolkappen komen in de ultravioletopnamen veel duidelijker uit; men zou moeten besluiten, dat er boven deze gebieden een ijle mist zweeft in de hoogste dampkringslagen. Treffend is het verdwijnen van de detailstructuren aan de rand, waar men over een grote diepte door de dampkring heen kijkt. De planeet heeft een grotere albedo dan de maan of Mercurius en haar

helderheid verandert langzamer, als de fasehoek toeneemt (afb. 11). Het spectrum vertoont de banden van kooldioxyde (CO_2) in het infrarood, overeenkomend met een laag van 90 meter-atmosfeer; de hoeveelheid is 1,8 maal zo groot als in de aardse dampkring. Onlangs is ook water aangetoond (tussen 0,01 en 0,1 mm condenseerbaar water). De aanwezigheid van kleine hoeveelheden zuurstof en koolmonoxyde (CO) is nog twijfelachtig. Zo is dus op Mars wel een dampkring aanwezig, maar zeer ijl; volgens de metingen van het ruimteschip Mariner-4 en andere waarnemingen bedraagt de druk 10 millibar en komt de dichtheid overeen met die van de aardse dampkring op 27 km hoogte. Bij dergelijke geringe dichtheid is het opwervelen van stof moeilijk te begrijpen, maar er kunnen plaatselijke stormen zijn.

De temperatuur van het oppervlak bedraagt aan de equator —60° C tot +20° C, volgens het ogenblik van het etmaal; de poolkap is gewoonlijk bij —65°. Extreem gemeten waarden zijn: —131° C aan de poolkap, +30° C bij de equator. Op de donkere partijen is de temperatuur gemiddeld 8° warmer dan over de roodbruine vlakten. De dagelijkse temperatuurschommelingen zijn zeer groot.

Mars heeft twee satellieten: Phobos en Deimos. Het zijn zeer kleine hemellichamen met een middellijn van slechts enkele km, die respectievelijk in 7 uur 39 minuten en in 30 uur 18 minuten om de planeet draaien; de eerste van deze omloopstijden is de kortste van het gehele planetenstelsel.

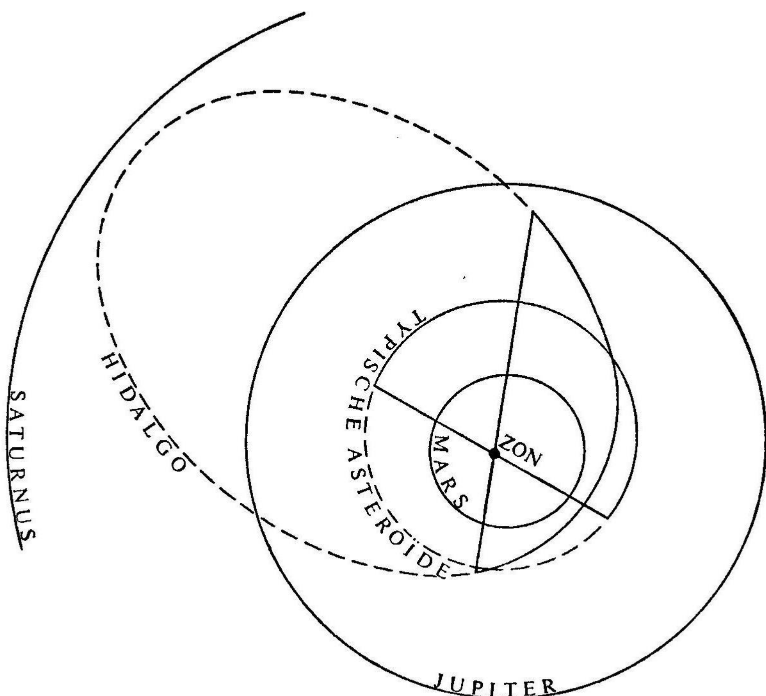
I.5.4 *De planetoïden*

Reeds lang geleden hebben de astronomen het vermoeden geuit, dat er zich een of ander hemellichaam moest bevinden in de ruimte tussen Mars en Jupiter; zij werden daarbij geleid door de regel van Titius-Bode (zie deel 2, I.1.2). Inderdaad is die verwachting bewaarheid; er is echter in die gordel niet één, maar een aantal hemellichamen ontdekt; zij zijn zoveel kleiner dan de gewone planeten, dat men ze met de bijzondere naam planetoïden of asteroïden aanduidt. De helderste en eerst ontdekte zijn: Ceres (Piazzi 1801), Vesta, Pallas en Juno. Hoewel alle heldere planetoïden thans bekend zijn, vindt men nog geregeld nieuwe van geringe lichtsterkte. Alles bij elkaar zijn er nu 1685 waarvan de banen met zekerheid bepaald zijn; tot de 14de of 15de grootte zijn ze wel alle bekend, maar met de bestaande kijkers moeten er nog wel 100 000 zwakkere te ontdekken zijn. Het opsporen geschiedt door op goed geluk opnamen te maken in de ecliptica en te zoeken naar lichtstipjes die een merkbare verplaatsing ten opzichte van de sterren vertonen. Het berekenen van de banen en het bewaken van de planetoïden is een zo omvangrijk werk,

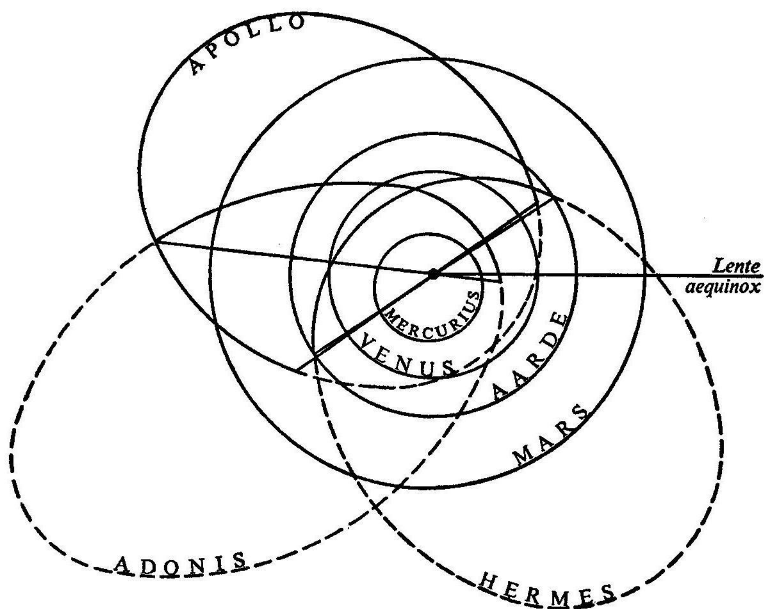
dat het slechts ten dele kan worden uitgevoerd; sommige sterrenwachten hebben zich hier speciaal op toegelegd (Ukkel, Heidelberg). Alle waarnemingen worden gecentraliseerd, de banen berekend en de ephemeriden gepubliceerd door de instituten te Leningrad en te Cincinnati.

De planetoïden worden aangegeven door een nummer, in volgorde van ontdekking. De gemiddelde afstanden van deze hemellichamen tot de zon hebben allerlei waarden, meestal tussen 2,3 en 3,3 maal die van de aarde. Er zijn echter gapingen, bij de omloopstijden die in een eenvoudige verhouding staan tot de omloopstijd van Jupiter: blijkbaar zijn de planetoïden die vroeger in die banen liepen, door herhaalde storingen op de wijze van resonantie uit hun baan geworpen. De banen hebben gemiddeld een grote excentriciteit (0,15) en een aanzienlijke helling (9°30′), Enkele planetoïden onderscheiden zich door de zeer bijzondere vorm of ligging van de baan (afb. 23, 24 en 25).

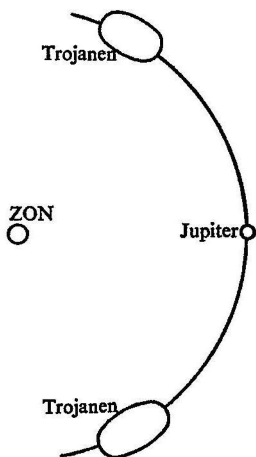
(433) Eros nadert de aarde tot op 0,15 astronomische eenheden en was daardoor van groot nut voor het bepalen van de zonneparallax (zie



Afb. 23 Merkwaardige planetoïden-baan (Hidalgo).



Afb. 24 Merkwaardige planetoïden-banen (Apollo, Adonis, Hermes).



Afb. 25 Merkwaardige planetoïden-banen (de Trojanen); naar Watson.

echter deel 2, I.4.2 en deel 1, III.6.4). Uit de onregelmatige lichtvariaties met een periode van 5 uur 16 minuten blijkt, dat het een langwerpig lichaam is van 35 km × 16 km × 7 km, draaiend om een as die loodrecht staat op de grootste afmeting. Bij de oppositie van 1931 heeft men deze langwerpige vorm direct door de kijker kunnen waarnemen en de rotatie kunnen volgen.

(944) Hidalgo heeft een uitzonderlijk grote baan met een halve lange as van 5,71 A.E., 43° op de ecliptica hellend; excentriciteit 0,65. Hermes, de kleinste van de bekende planetoïden, middellijn 1 tot 2 km, naderde de aarde tot op 2½ maal de afstand aarde-maan, was slechts waarneembaar gedurende vier dagen en is daarna niet meer teruggevonden. Ook Apollo en Adonis kwamen heel dicht bij de aarde en zijn daarna snel uit het gezicht verdwenen.

(1566) Icarus heeft de grootste excentriciteit van alle planetoïden (e = 0,827). Hij duikt ver binnen de baan van Mercurius en verwijdert zich tot 1,97 A.E. van de zon, dus voorbij de Marsbaan. Op 14 juni 1968 ging hij op slechts 7 miljoen km langs de aarde voorbij.

De twaalf Trojanen volgen bij benadering de baan van Jupiter; een groep is 60° vóór op de planeet, een andere 60° achter (afb. 25).

Slechts enkele planetoïden zijn zo groot, dat men met de kijker de afmeting ervan kan bepalen. Nu geldt voor elke planeet of satelliet: lichtsterkte = const. × albedo × oppervlak (bij gegeven afstand van de zon en van de aarde). Uit de meting van de lichtsterkte en van het oppervlak kan men dus de albedo afleiden. Men vindt zeer verschillende waarden (0,06 tot 0,26). Omgekeerd kan men nu ook voor de kleinere planetoiden een gemiddelde waarde van de albedo aannemen en uit de lichtsterkte berekenen hoe groot ze zijn; zie onderstaande tabel.

naam	*middellijn*	*helderheid op 1 astronomische eenheid van zon en aarde (in magnituden)*	*albedo*
Ceres	770 km	$3^m,70$	0,06
Pallas	490 km	$4^m,38$	0,07
Juno	193 km	$5^m,74$	0,12
Vesta	386 km	$3^m,50$	0,26
---	27 km	10^m	0,12
---	2,7 km	15^m	0,12

Het blijkt dat vele planetoïden een middellijn hebben niet groter dan 15-75 km en dat de kleinste ternauwernood één km halen. Hun totale massa bedraagt, indien men rekening houdt met de nog te ontdekken exemplaren, niet veel meer dan 1/1000 van die van de aarde. Bij een aantal planetoïden zijn onregelmatige helderheidswisselingen waargenomen, soms met een periode van 3 tot 17 uren, andere malen geheel grillig, zoals men die zou verwachten bij onregelmatig gevormde rotsblokken die, wentelend, nu eens een kleiner, dan weer een groter oppervlak naar ons toe keren en waarvan de verschillende delen ook een ongelijke albedo kunnen vertonen. Gemiddeld neemt de helderheid zeer snel af met de fasehoek, nog sneller dan bij de maan, zodat wij moeten onderstellen, dat het oppervlak in nog sterkere mate poreus is (afb. 11). Ook de studie van de polarisatie leert dat er een grote gelijkenis bestaat tussen de wijze waarop deze hemellichamen het licht verstrooien en die welke bij de maan en Mercurius voorkomt. Vermoedelijk is hun oppervlak eveneens door het inslaan van talloze kleine meteorietjes omgewoeld.

I.5.5 *Jupiter*

Jupiter is de grootste van de planeten en tevens de snelst roterende (9 uur 55 minuten); zie plaat 13. De duidelijke afplatting hangt natuurlijk samen met die snelle rotatie, maar is zo aanzienlijk, dat men ook nog besluiten moet tot een snel toenemen van de dichtheid van buiten naar binnen (zie deel 2, I.5.10). De as helt slechts 3° op het baanvlak, er zijn dus geen seizoenen. Dat deze gasbol, onder de geweldige druk van zijn grote massa, een gemiddeld soortelijk gewicht heeft niet veel groter dan dat van water, bewijst al dat hij in hoofdzaak uit het lichtste gas, waterstof, moet bestaan. Berekening toont, dat een verdere toevoeging van massa tot gevolg zou hebben dat de straal *afneemt*, doordat de atomen dan in elkaar gedrukt zouden worden en 'ontaarding' van het gas zou optreden. Jupiter is aldus het grootste hemellichaam dat (zonder verhitting door kernprocessen) bestaan kan.

De hoge albedo bewijst dat de planeet met wolken omhuld is. Zij vertoont bruinachtig getinte gordels die evenwijdig aan de evenaar lopen en die wisselen van plaats en vorm, terwijl ook de grenzen ervan grillige bochten en donkere vlekken vertonen; dit zijn wolkengebieden in discontinu begrensde atmosferische stromen. De sluier of subtropische storing is een donkere strook, al in 1901 waargenomen. De rode vlek is een merkwaardige vorming die het eerst als zodanig in 1878 beschreven werd en sedertdien tijdelijk verbleekte, later af en toe weer veel duidelijker werd. Die vlek is waarschijnlijk het uiteinde van een 'Taylorzuil': ten gevolge van de snelle aswenteling van Jupiter kan zich aan een of andere

oneffenheid van het vaste oppervlak beneden de wolken een cilindrische vloeistofzuil vormen, waarvan de as evenwijdig moet zijn aan de draaiingsas van de planeet; ze blijft in rust te midden van de snel stromende omgeving, maar draait om haar as in 9 dagen. Ze is een paar graden kouder dan de omgeving.

De hoeksnelheid waarmee de planeet wentelt, is aan de evenaar het grootst; de omwenteltijd I bedraagt daar 9 uur 50 minuten 30,003 seconde; de naburige gordels vertonen een omwenteltijd II van 9 uur 55 minuten 40,632 seconde; aan de grenzen van de verschillende gordels verspringt de snelheid plotseling. De omwenteltijden zijn niet met deze nauwkeurigheid waargenomen, maar conventioneel vastgesteld om steeds een referentiemeridiaan voor plaatsbepaling te hebben. De bandenstructuur van de planeet vertoont duidelijk een elfjarige periode, overeenkomend met die van de zonneactiviteit.

Spectroscopisch onderzoek heeft aangetoond, dat de atmosfeer boven de wolken methaan en ammoniak bevat (Wildt, Dunham; plaat 14). Van het eerste gas (CH_4) is boven de wolken evenveel aanwezig als in een laag van 100 meter bij normale temperatuur en druk; van het tweede gas (NH_3) is er evenveel als in een laag van 10 meter. Vermoedelijk zullen er behalve methaan ook andere koolwaterstoffen voorkomen; bij de lage temperatuur van de planeet is de dampdruk ervan echter veel te gering om merkbare absorptie te veroorzaken.

Daarnaast zijn zwakke spectrumlijnen ontdekt van het waterstofmolecule (quadrupoolstraling). Deze lijnen hebben een gering absorberend vermogen, zodat de hoeveelheid waterstof wel zeer groot moet zijn: die moet overeenkomen met een laag van de orde van 50 km (bij normale temperatuur en druk). Helium, ongetwijfeld aanwezig, is in het zichtbare spectraalgebied niet aan te tonen. Bij sterbedekkingen door Jupiter (σ Arietis, 1952) heeft men gevonden dat er zich straalkromming voordoet, wijzend op een moleculair gewicht van de atmosferische gassen van ongeveer 3,3 à 4,3; ook dit gegeven bevestigt dat de dampkring veel waterstof en helium moet bevatten. Op die grote hoogte is de temperatuur —200° C.

De temperatuur van het wolkenoppervlak is ongeveer —110° C, hoger dan het kookpunt van methaan, lager dan het vriespunt van ammoniak. De wolken bestaan dus uit ammoniakkristallen. Van hun bruinige, gelige, groenige tinten is de oorsprong niet bekend; men heeft ondersteld, dat polymeren van organische stoffen deze kleuren veroorzaken. De druk bedraagt daar verscheidene atmosferen.

Bij deze planeet zijn hoogst merkwaardige radiostralingen ontdekt, die bewijzen dat Jupiter een magneetveld moet hebben. *1* De radiostraling

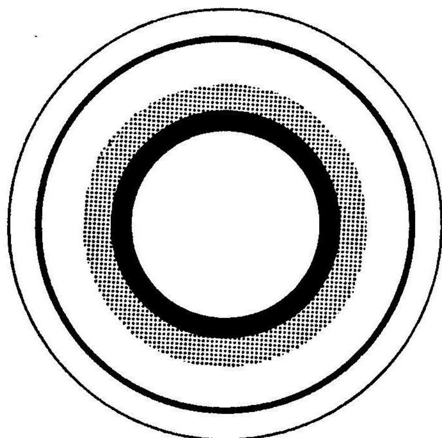
met een golflengte van enkele cm, de normale thermische emissie van de planeet, wijst op een temperatuur van —90° C. *2* Decimetergolven, sterk gepolariseerd (synchrotronstraling), zijn vermoedelijk afkomstig van een gordel geladen deeltjes, gevangen in het magneetveld van de planeet en vergelijkbaar met de Van Allen-gordels. Zij strekken zich uit aan beide kanten van de planeet, tot een afstand van een planeet-diameter (zie deel 2, I.5.3). De magnetische as helt 9° ten opzichte van de rotatieas. *3* Metergolven verschijnen in groepen van plotselinge sterke stoten, die dikwijls slechts 1 seconde of zelfs maar 0,001 seconde duren. Ze gaan uit van twee of drie bronnen die verwonderlijk constant op dezelfde plaats van het oppervlak blijven en telkens op dezelfde tijd terugkeren (rotatietijd III van 9 uur 55 minuten 29,37 seconden). Deze straling wordt op merkwaardige wijze beïnvloed door Io, de binnenste van de vier Galilei-satellieten. Uit de sterkte van de radiostraling berekent men, dat het magneetveld bij Jupiter op die hoogte ongeveer tien maal zo sterk zou zijn als op het aardoppervlak.

Jupiter heeft een aantal satellieten. De eerste vier zijn reeds door Galilei ontdekt in 1610; ze storen elkaar op ingewikkelde wijze en worden ook door de equatoriale aanzwelling van Jupiter en door de zon gestoord. Met onze beste kijkers kunnen we enkele van hun oppervlaktedetails waarnemen; men krijgt de indruk dat zij altijd dezelfde zijde naar de planeet toe keren. Ze hebben een hoge albedo, wellicht een bewijs dat ze bedekt zijn met vaste gassen of met ijs. Af en toe verdwijnen ze in de schaduwkegel van Jupiter; uit de ogenblikken van deze verduisteringen heeft Römer in 1675 voor het eerst de snelheid van het licht bepaald. In de laatste tijd is er gebruik van gemaakt om te onderzoeken, hoe de lichtverdeling is aan de grenzen van de schaduwkegel, en om daaruit af te leiden, hoe de zonnestralen gebroken of geabsorbeerd worden in de hoge atmosfeer van Jupiter; men vindt, dat deze atmosfeer nog een merkbare lichtverzwakking veroorzaakt op een hoogte van 0,20 R boven de zichtbare straal R van de planeet. De binnenste van de Galilei-satellieten, Io, vertoont telkens een toegenomen helderheid, nadat hij in een paar uur door de schaduwkegel van de planeet is gegaan; na ongeveer 15 minuten is die extra-helderheid weer verdwenen: dit zou kunnen wijzen op een ijle dampkring en rijpvorming. Daarnaast zijn er acht zwakkere satellieten die alleen met sterke kijkers waarneembaar zijn. Ze worden genummerd in de volgorde van hun ontdekking. X en XI zijn van de 19de stergrootte, dus aan de grens van wat onze beste telescopen vertonen. De satellieten VIII, IX, XI en XII draaien tegengesteld aan de normale baanbeweging van de overige planeten en satellieten; men kan waarschijnlijk maken, dat alleen daardoor hun banen stabiel zijn.

1.5.6 *Saturnus*

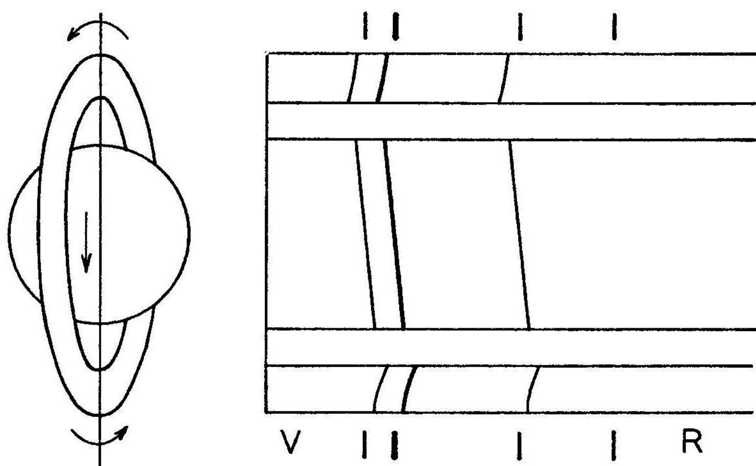
Saturnus is iets kleiner dan Jupiter (zie plaat 15). Van alle planeten heeft zij het geringste soortelijk gewicht (0,72) en de sterkste afplatting (1/9,2). De planeet moet in belangrijke mate uit waterstof bestaan. Het voorkomen van de geelachtige wolkengordels is in overeenstemming met de snelle rotatie. De omwenteltijd neemt toe, naarmate men op hogere breedte waarneemt: aan de equator bedraagt hij 10 uur 14 minuten, op hogere breedten 10 uur 39 minuten. Donkere vlekken komen hier niet voor aan de grenzen van de gordels, maar in de gordels zelf. De temperatuur bedraagt —160° C. De spectroscoop vertoont ons weer de absorptiebanden van methaan, en wel sterker dan bij Jupiter; of ammoniak waarneembaar is, is onzeker (zie plaat 13). Dit is een gevolg van de nog lagere temperatuur: aangezien het vriespunt van ammoniak hoger ligt dan dat van methaan, zal het bij dalende temperatuur eerder uitkristalliseren. Ook bij deze planeet is moleculaire waterstof (H_2) aangetoond.

Saturnus is de enige planeet die een ring vertoont. Wij zien deze meestal hellend, een enkele keer precies op zijn kant, en kunnen dan nagaan dat hij uitermate dun moet zijn (1 km). Stelt men hem voor door een model van 1,70 m middellijn, dan bedraagt op die schaal de dikte 0,01 mm. De 'ring' is eigenlijk een ringenstelsel (afb. 26). Men onderscheidt: de buitenste ring A; de middelste ring B, die het helderst is; de floersring C, die als een waas zichtbaar is tegen de achtergrond van de verlichte planeet.



Afb. 26 Als wij loodrecht op het ringenstelsel van Saturnus konden waarnemen...

Tussen deze ringen zijn smalle, donkere tussenruimten. Uit verschillende overwegingen blijkt dat de ringen uit een groot aantal afzonderlijke blokjes bestaan: *1* Een samenhangende ring op zo korte afstand van de planeet zou niet stabiel zijn. *2* De ring blijkt geen dampkring te hebben: de afzonderlijke gesteenten zijn te klein om deze te kunnen binden. *3* Althans een gedeelte van het ringenstelsel is doorzichtig, zoals men kan waarnemen, wanneer het een ster of een van de satellieten van Saturnus bedekt. *4* De helderheid van de ringen neemt toe, wanneer we ze waarnemen uit dezelfde richting waarin de zon hen beschijnt, dus wanneer Saturnus in oppositie staat. Dit is te vergelijken met de grotere lichtsterkte van de Volle Maan en evenzo te verklaren door 'poreusheid', preciezer gezegd door de ringen samengesteld te denken uit een aantal afzonderlijke korrels. *5* De spectrumlijnen in het spectrum van de ring vertonen een verplaatsing, overeenkomend met de draaiing die het stelsel om de planeet uitvoert; aan de ene zijde zijn ze naar rood, aan de andere zijde naar violet verschoven (afb. 27). Wentelde de ring als geheel, dan moest de golflengteverplaatsing aan de buitenranden van de ring groter zijn dan aan de binnenranden; zoals ook de verplaatsing op de planeet zelf naar de randen toeneemt (Maxwell, 1890). Men vindt integendeel:



Afb. 27 Doppler-effect in het spectrum van Saturnus en van de ringen. De spleet van de spectrograaf is tot samenvallen gebracht met de evenaar van de planeet, die op de afbeelding verticaal is gericht. Van boven naar beneden: vergelijkingsspectrum, ring, Saturnus, ring, vergelijkingsspectrum.

op de ring hellen de lijnen in tegengestelde zin van wat men op de planeet waarneemt. Dit is alleen mogelijk, als de ring uit afzonderlijke stukjes bestaat, die elk onafhankelijk van de andere hun omloop volbrengen; want dan zijn ze te vergelijken met planeten die om de zon lopen, en dan moet hun snelheid groter zijn, naarmate ze dichter bij de planeet staan. Lange tijd dacht men, dat de donkere onderbrekingen overeenkomen met omloopstijden van $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{4}$ ... van die van de satellieten; dit schijnt echter niet houdbaar (vergelijk deel 2, I.5.4).

Over de afmeting van de blokken is men nog in het onzekere; vermoedelijk wisselt de grootte ervan tussen 1 cm en 10 m. Ze bestaan zeer waarschijnlijk uit ijs of ze zijn met rijp bedekt. Opnamen met kleurenfilters leverden de verrassende waarneming op, dat de floersring doorzichtig is voor het ultraviolet en ondoorzichtig voor het infrarood; dit verschijnsel is nog volkomen onopgehelderd. Uiterst interessant zijn de momenten waarop de aarde door het vlak van het ringenstelsel gaat en waarop wij dit op zijn kant zien; ongeveer op hetzelfde tijdstip schijnt ook de zon in het vlak van de ringen. Al naar gelang van het precieze ogenblik kan men het stelsel rakelings waarnemen aan dezelfde zijde vanwaar het zeer schuin invallende zonlicht komt, of aan de tegengestelde zijde. In het spectrum van de ring ontbreken de banden van methaan en ammoniak: de ring heeft dus geen atmosfeer, zoals men ook kon verwachten.

Van de tien satellieten van Saturnus is bijzonder interessant Titan, die een atmosfeer van methaan blijkt te hebben (Kuiper, 1944); de laag is minder dik dan bij Saturnus. Deze satelliet is zo klein, dat hij zijn atmosfeer bij een ietwat hoge temperatuur niet had kunnen behouden, zodat men moet aannemen dat die zich pas gevormd heeft toen hij al was afgekoeld. De vijf binnenste satellieten althans schijnen uit ijs te bestaan.

I.5.7 *Uranus*

Uranus is kleiner dan Saturnus. De afplatting is ook geringer en bedraagt 1/14. De rotatietijd is uit de verschuiving van de spectrumlijnen bepaald op 10 uur 49 minuten. De temperatuur is naar schatting —180° C of nog lager. Van ammoniak zijn er geen banden meer te bespeuren, blijkbaar omdat het gas geheel uitgevroren is en bij die temperatuur geen voldoende dampdruk meer heeft; de hoeveelheid methaan daarentegen is aangegroeid en equivalent met een laag van 1500 m boven de wolken. De aanwezigheid van moleculaire waterstof (H_2) in het spectrum is aangetoond. Het inwendige van de planeet kan echter niet veel meer dan 20% waterstof bevatten. Het oppervlak is moeilijk te bestuderen wegens de geringe schijnbare afmetingen. Uranus heeft vijf satellieten: zij lopen in eenzelfde

vlak dat bijna loodrecht op de ecliptica staat (helling 98°) en dat tevens het equatorvlak van de planeet is.

I.5.8 *Neptunus*

Neptunus werd ontdekt in 1846 door Le Verrier en Adams uit de storingen die zij in de loop van Uranus teweegbrengt. Haar rotatietijd werd spectroscopisch bepaald op 15 uur 8 minuten. De temperatuur is hier vermoedelijk gedaald tot —210° C. De methaanatmosfeer heeft een zeer grote dikte, equivalent met een laag van 2500 m; het bandenspectrum van deze stof vertoont zich in een volledigheid die onbereikbaar is in het laboratorium (40 bandenkoppen). Ook hier is moleculaire waterstof gevonden.

Neptunus heeft één enkele, grote satelliet, Triton, die teruglopend is, en een veel kleinere, Nereïs, eveneens teruglopend, terwijl de planeet zelf in de normale zin wentelt. Uit de storingen van Triton kan men afleiden, dat Neptunus een afplatting van 1/40 moet vertonen.

Jupiter, Saturnus, Uranus en Neptunus vertonen klaarblijkelijk een grote verwantschap en een geleidelijke verandering in eigenschappen. Dit geldt zowel voor de grootte, de massa, de dichtheid, de afplatting en de rotatietijd als voor de aantallen satellieten en voor de temperatuur. Vandaar de samenvattende benaming reuzenplaneten.

I.5.9 *Pluto*

Zoals Neptunus gevonden is uit de storingen die deze planeet uitoefent op Uranus, zo heeft men getracht een nog verder verwijderde, transneptunische planeet op te sporen op grond van kleine, nog onverklaarbare storingen in de banen van Neptunus en Uranus. De berekening was in dit geval veel moeilijker, de plaatsbepaling veel minder zeker; toch slaagden Gaillot en Lowell erin, de richting aan te wijzen, waarin de planeet zich inderdaad bevond. De ontdekking gelukte Tombaugh in 1930 na jarenlang systematisch onderzoek.

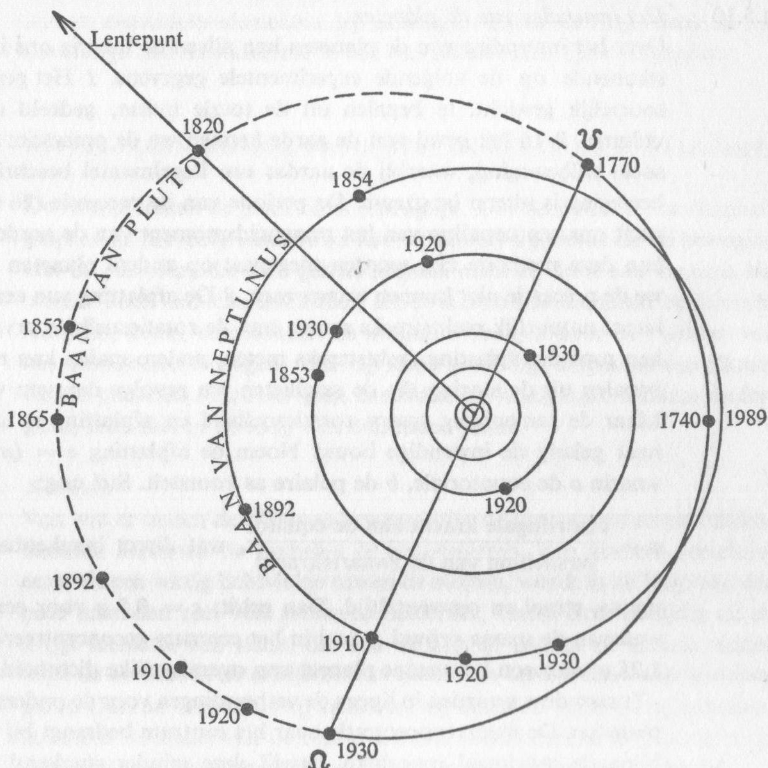
Pluto doet zich voor als een zwak sterretje van de 15de grootte, alleen

---

Plaat 11 Kaart van Mars in Mercatorprojectie. Getekend door G. de Mottoni, naar foto's verkregen op de Pic-du-Midi.

Plaat 12 Het Marsoppervlak, opgenomen door het ruimteschip Mariner-4, van een afstand van 10 000 km. Elk van de kleine schaaldelen aan de rand komt overeen met ongeveer 7 km. Grote en kleine kraters, evenals op de maan. NASA en Jet Propulsion Laboratory, Pasadena.

als planeet te herkennen doordat het zich verplaatst tussen de sterren. De baan loopt gedeeltelijk binnen die van Neptunus (afb. 28). De bepaling van de massa is in hoge mate onzeker. De diameter is moeizaam bepaald door rechtstreekse meting en door een ster-bedekking (1965);



Afb. 28 Banen van Neptunus en Pluto (naar J. van der Bilt).

Plaat 13 Jupiter. Op de rechter opname de schaduw van satelliet III. Opname Pease, Mt. Wilson.

Plaat 14 De spectra van de reuzenplaneten. Van boven naar beneden: Maan, Jupiter, Saturnus, Uranus en Neptunus. Het spectrum van de maan is identiek aan dat van de zon en dient ter vergelijking (naar Slipher). Bij λ 6460 ziet men de band van NH_3 in het spectrum van Jupiter.

hij is iets kleiner dan die van de aarde. Daaruit volgt een zeer geringe albedo, vergelijkbaar met die van de maan. De helderheid schommelt met een periode van 6 uur 16 minuten 54 seconden, hetgeen vermoedelijk de omwenteltijd van de planeet is.

I.5.10 *Het inwendige van de planeten*

Over het inwendige van de planeten kan alleen de theorie ons inlichten, steunende op de volgende experimentele gegevens. *1* Het gemiddelde soortelijk gewicht, te bepalen uit de totale massa, gedeeld door het volume. *2* In het geval van de aarde kennen we de precessie: dit is een soort tolbeweging, waarbij de aardas een kegelmantel beschrijft; deze beweging is uiterst langzaam. De periode van de precessie (26 000 jaar) geeft ons een bepaling van het traagheidsmoment van de aarde. Helaas kan deze methode niet worden toegepast op andere planeten waarvan we de precessie niet kunnen waarnemen. *3* De afplatting van een planeet hangt natuurlijk rechtstreeks samen met de rotatiesnelheid ervan; soms kan men de afplatting rechtstreeks meten, andere malen kan men deze bepalen uit de storing die de satellieten ten gevolge daarvan vertonen. Maar de samenhang tussen rotatiesnelheid en afplatting is anders, al naar gelang de inwendige bouw. Noem de afplatting $\varepsilon = (a - b)/a$, waarin a de equatoriale, b de polaire as voorstelt. Stel nog:

$$\varphi = \frac{\text{centrifugale kracht aan de equator}}{\text{versnelling van de zwaartekracht}},$$ wat direct berekenbaar is uit massa, straal en omwenteltijd. Dan geldt: $\varepsilon = 0{,}5\ \varphi$ voor een planeet waarvan de massa vrijwel geheel in het centrum geconcentreerd is; $\varepsilon = 1{,}25\ \varphi$ voor een homogene planeet van overal gelijke dichtheid.

Tussen deze waarden in liggen de verhoudingen voor de onderscheidene planeten. De massaconcentratie naar het centrum bedraagt bij Saturnus bijna de maximaal mogelijke, terwijl deze minder sprekend is bij de overige reuzenplaneten. Mars is het meest homogeen gebouwd van alle planeten.

Met behulp van deze gegevens en wat we uit de spectroscopie afleiden omtrent de samenstelling van deze hemellichamen, kunnen we nu trachten de inwendige bouw ervan te ontcijferen. Van groot belang daarvoor is de kennis van de materie onder een druk van honderdduizenden atmosferen, hoger dan wij op dit ogenblik in het laboratorium kunnen bereiken. Er wordt meestal aangenomen dat Venus en de aarde een kern van ijzer hebben, omgeven door een mantel van silicaten; sommigen beschouwen echter de kern als gelijk in samenstelling met de mantel, maar door een fasenovergang verdicht. Deze planeten zouden dezelfde samenstelling

hebben; Mercurius echter moet uit iets zwaardere stoffen bestaan, aangezien hij, vergeleken met Mars bijvoorbeeld, bij *kleiner* volume en dus minder druk, een *hoger* soortelijk gewicht heeft. Jupiter en Saturnus bestaan hoofdzakelijk uit vaste waterstof die 'uitgesneeuwd' is, terwijl het helium in de dampkring zou overheersen. Bij Uranus en Neptunus zijn er zwaardere elementen bij gemengd. Onder de hoge druk in het inwendige zou de waterstof in een metallische fase zijn overgegaan.

I.6 ROTSBLOKKEN, STENEN, GRUIS, STOF EN GAS IN DE HEMELRUIMTE

De ruimte tussen de planeten is ontzaglijk. Dat deze ruimte, mechanisch gesproken, als ledig beschouwd kan worden, volgt reeds uit de beweging van de planeten, die zich geheel afspeelt alsof zij door een vacuüm bewegen. Toch kan men laten zien, dat er talloze hoeveelheden stofkorrels, steentjes, keien, rotsblokken en atomaire deeltjes door de ruimten van het zonnestelsel bewegen, maar op zulke geweldige afstanden van elkaar, dat de planeten daardoor geen aantoonbare wijzigingen kunnen ondergaan, zelfs niet in de loop van duizenden jaren.

I.6.1 *Kometen*

Van wat er tussen de planeten beweegt, zijn de grootste en meest opzienbarende lichamen de kometen of staartsterren. Een komeet verschijnt eerst als een wazig lichtvlekje tussen de sterren, wordt in de loop van een paar maanden zeer veel groter en helderder, breidt zich eenzijdig uit en krijgt tenslotte een staart die van de zon af gericht is. Enkele weken blijft de komeet in de nabijheid van de zon en bereikt daar haar grootste glans. Daarna verwijdert zij zich weer op dezelfde wijze als zij gekomen is, steeds de staart van de zon af kerend, verminderend in grootte en in helderheid, en tenslotte zich verliezend in de diepten van het heelal.

Een dergelijke onverwachte verschijning heeft sedert eeuwen de schrik van de bevolking opgewekt. Het was een belangrijke stap, toen Halley in 1682 voor één bepaald geval duidelijk kon aantonen, dat eenzelfde komeet periodiek teruggekeerd was met tussenruimten van 76 jaren. Deze komeet, voortaan naar hem genoemd, volgde dus blijkbaar een gesloten baan, een ellipsbaan, zij het ook veel langgerekter dan een gewone planetenbaan. Zij was dus een blijvende bewoonster van het planetenstelsel. Sedertdien heeft men hetzelfde kunnen bewijzen voor een 200-tal andere kometen.

Daarnaast is er echter een 300-tal waarvan de baan vrijwel niet van een parabool te onderscheiden is. Doordat wij ze slechts kunnen waarnemen

in de onmiddellijke nabijheid van de zon, is het uiterst moeilijk uit dit korte stukje af te leiden, hoe de baan verder verlopen zal en of de gevolgde curve net iets meer of net iets minder wijd geopend is dan een parabool (vergelijk afb. 5). De parabool zelf, een grensgeval, wordt nooit precies verwezenlijkt. Er is echter een plausibiliteitsoverweging die ons wel aanwijzingen kan geven. Indien alle kegelsneden konden voorkomen, zou men verwachten, evengoed allerlei soorten hyperbolen als allerlei ellipsen waar te nemen. Feitelijk echter vindt men, behalve een groot aantal ellipsen en een groot aantal quasi-parabolen slechts een klein aantal banen die nog net merkbaar voorbij de grens liggen en als hyperbolisch te beschouwen zijn. Van deze 34 hyperboolbanen hebben echter E. Strömgren en anderen kunnen bewijzen, dat ze vrijwel stuk voor stuk ontstaan zijn uit een elliptische baan ten gevolge van de storingen door planeten, meestal door Jupiter. Het is dus in hoge mate waarschijnlijk, dat alle kometen ellipsbanen beschrijven en als bestendige leden van het zonnestelsel moeten worden beschouwd. Slechts af en toe gaat er een door storingen verloren. Betreffende de banen valt nog op te merken, dat de kometen met korte perioden (beneden de 200 jaar) meestal dicht bij de ecliptica lopen, terwijl die met lange perioden hun baanvlak onder allerlei hellingen hebben gericht en zelfs even dikwijls teruglopend als rechtlopend zijn. Omloopstijden van duizenden jaren komen voor. Gemiddeld worden er ongeveer drie nieuwe kometen per jaar ontdekt, meestal bij toeval. De baanelementen van enkele bekende kometen zijn in nevenstaande tabel verwerkt.

Van een opvallend groot aantal ellipsbanen ligt het verste punt nabij de Jupiterbaan. Blijkbaar zijn vele kometen door de sterke aantrekkende werking van die planeet 'gevangen', op het ogenblik waarop ze de baan van Jupiter doorkruisten. Men spreekt van de Jupiterfamilie (afb. 29). Het bestaan van overeenkomstige families voor andere planeten valt zeer te betwijfelen.

Weer een ander begrip is dat van de kometengroepen (Hoek). De kometen van 1668, 1843, 1880, 1882, 1887, 1947 en 1965 zijn volkomen onderscheiden hemellichamen, maar lopen toch in naburige banen met een omloopstijd van 400 tot 1000 jaar. Men kan zich voorstellen, dat een komeet zich in verschillende fragmenten heeft verdeeld, die geleidelijk door storingen verder uiteen zijn gegaan; bij de komeet van Biela en bij die van 1882 kon men dit rechtstreeks waarnemen. Zo zijn er een vijftien groepen bekend, elk bestaande uit twee tot vijf kometen.

Bij volledige ontwikkeling vertoont een komeet de volgende delen:

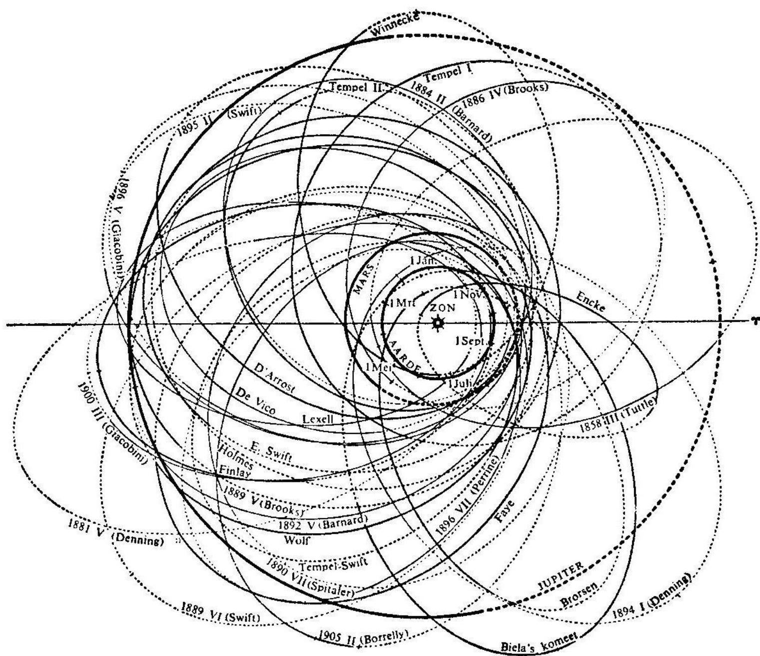
TABEL: BAANELEMENTEN VAN ENKELE BEKENDE KOMETEN

			periode (in jaren)	*helling baanvlak*	*halve lange as*	*excentriciteit*	*dichtste punt (in A.E.)*	*verste punt (in A.E.)*
1	Encke	1960 i	3,30	12°,4	2,22	0,847	0,339	4,094
2	Giacobini-Zinner	1959 b	6,42	30°,9	3,46	0,729	0,936	5,976
3	Biela	1852 III	6,62	12°,6	3,53	0,756	0,861	6,190
4	Brooks	1960 VI	6,72	5°,6	3,56	0,505	1,763	5,359
5	Daniel	1950 V	7,09	20°,1	3,69	0,550	1,661	5,72
6	Schwassmann-Wachmann 1	1957 IV	16,10	9°,5	6,39	0,131	5,538	7,21
7	Pons-Brooks	1954 VII	70,86	74°,2	17,13	0,955	0,774	33,480
8	Halley	1910 II	76,03	162°,2	17,94	0,967	0,587	35,303
9	Donati	1858 VI	–	117°,0	337	0,997	1,009	–
10	Mrkos	1957 V	–	93°,94	548	0,999	0,355	–
11	Cunningham	1941 I	–	49°,87	–	1,000	0,368	–
12	Arend-Roland	1957 III	hyp	119°,95	–	1,000 2	0,316	–
13	Morehouse	1908 III	hyp	140°,18	–	1,000 7	0,945	–

kern *koma*	kop
staart	

De kop van een komeet heeft een middellijn van de orde van 100 000 km; de staart kan van 10 tot 100 miljoen km bedragen. Deze afmetingen zijn ontzaglijk, maar de massa van het hemellichaam is uiterst gering. De kern is slechts enkele km groot.

Uit een aantal onderzoekingen is men tot een algemeen beeld gekomen betreffende de bouw van de kometen en van de processen die zich daarin afspelen. Wij nemen aan, dat de kern bestaat uit een blok 'ijs', een



Afb. 29 De Jupiterfamilie.

conglomeraat van bevroren water, bevroren kooldioxyde, bevroren ammoniak enzovoort. Ingesloten in die kern bevinden zich talloze keitjes, gruis, stofjes (model van Whipple, 1950). Door de zonnestraling verdampt het ijs, wanneer de komeet dichter bij de zon komt, en worden grote en kleine stofkorrels vrijgemaakt. De gassen en stofjes worden door stralingsdruk en door de zonnewind van de zon weggedreven; wegstromend vormen ze de staart die van de zon af gericht is. Wanneer de komeet zich verwijdert, loopt deze staart vóór het hemellichaam uit; maar er is geen aanleiding ons daarover te verwonderen, aangezien er geen medium is, waartegen wrijving optreedt en de staart dus geen reden heeft om achter te blijven. De zonnestraling wordt verstrooid in koma en staart; bestaan deze uit stofjes, dan is het verstrooide licht ongeveer identiek met het invallende zonlicht; bestaan ze uit gassen, dan worden slechts enkele stralingen verstrooid als resonantiestraling. Op hun reis van de kern naar de staart worden sommige moleculen fotochemisch ontbonden en geioniseerd door het ultraviolette zonlicht of door de zonnewind, zodat

de verschillende delen van de komeet ongelijk van samenstelling kunnen zijn.

Wij zullen nu deze algemene voorstelling nader toelichten. De komeetkern heeft een afmeting die meestal tussen 1 en 10 km bedraagt en een soortelijk gewicht tussen 0,1 en 0,001 (ten opzichte van water); hij moet dus zeer poreus zijn. De gassen komen vrij door verdamping van het ijs, of ook wel door loskomen van geadsorbeerd gas. Natuurlijk ontwikkelt zich des te meer gas, naarmate de komeet dichter bij de zon komt. Terwijl dus de lichtsterkte I van een planetoïde bijvoorbeeld op een afstand R van de zon en op een afstand D van ons oog beschreven wordt door de wet $I = \frac{c}{R^2D^2}$, vindt men voor kometen veeleer $I = \frac{c}{R^4D^2}$. Een betere wet verkrijgt men door de ontwikkeling van de staart te beschouwen als vrijmaking van bevroren of geadsorbeerd gas; is L de verdampingswarmte of adsorptiewarmte, dan vindt men $I = \frac{c}{D^2} \frac{e^{-L\sqrt{R}}}{kT_0}$. De uit de waarneming bepaalde waarden van L zijn plausibel. Deze beschouwingen zijn echter alleen van toepassing op kometen waarvan het lichtgeven regelmatig is; andere, die plotseling opvlammen, worden later besproken.

Vermoedelijk vertoont de komeetkern dikwijls een aswenteling; daar de dampontwikkeling altijd iets vertraagd is ten opzichte van de invallende straling, kan die dampontwikkeling plaatsvinden in een richting die van de voerstraal afwijkt: er ontstaat een reactiekracht die de komeet een weinig vertraagt of versnelt. In de laatste tijd wordt vermoed, dat er in de komeetkern vrije radicalen voorkomen en onverzadigde moleculen, die bij verwarming chemische reacties en ionenvorming zouden veroorzaken.

De uitgeworpen gassen stromen in alle richtingen weg; ze vertonen resonantieverstrooiing en ondergaan stralingsdruk in het felle zonlicht. Men heeft namelijk aangetoond, zowel theoretisch als experimenteel, dat elk lichaam dat getroffen wordt door straling en die straling absorbeert, daardoor tevens een zwakke impuls ondervindt. De werking van de stralingsdruk is het duidelijkst bij gassen en bij fijne stofkorrels.

Tegenwoordig weten we echter, dat de kracht van de stralingsdruk te enen male onvoldoende is om de waargenomen snelheden in komeetstaarten te verklaren. Veel belangrijker is het effect van de zonnewind (Biermann 1951; vergelijk deel 2, I.6.3) die de gassen meesleept, vooral wanneer deze zonnewind 'ingevroren' magnetische velden meevoert (van de orde van 10^{-5} oersted). De aanwezigheid van magnetische velden blijkt overigens uit de kenmerkende vezelige bouw van de komeet-

staarten. Wanneer er zonnevlammen of andere storingen optreden, waarvan sterkere en onregelmatige stoten van de zonnewind uitgaan, ziet men herhaaldelijk dat de kometen daar de inwerking van vertonen: de kern wordt scherper, de koma helderder, de staart kan een knik vertonen of wordt turbulent. Zo kunnen wij de kometen als echte 'proeflichamen' gebruiken om de zonnewind te onderzoeken. Daaruit heeft men onder meer besloten dat de zonnewind ook in perioden van geringe zonneactiviteit blijft uitstromen en dat hij niet alleen in het equatorvlak van de zon maar ook in *alle* richtingen wordt uitgezonden; de werking ervan is waargenomen tot voorbij 5 A.E. van de zon. Herhaaldelijk vertonen kometen een dubbele staart: de ene is sterker gekromd, wazig, en vertoont een continu spectrum: hij bestaat uit stof dat het zonlicht verstrooit (Type II); de andere is bijna recht, vertoont een fijne structuur met knobbeltjes en vezels, en heeft een resonantiespectrum van heldere lijnen: hij bestaat uit gas dat geïoniseerd is en dus veel sterker door de zonnewind wordt meegesleept: het is een plasmastaart (Type I; vergelijk plaat 19).

De theorie van de staartvormen is nog geen goed sluitend geheel. Het blijkt erg moeilijk, de snelheden te meten, waarmee de gassen uitstromen; dopplerverplaatsingen zijn niet waargenomen. Daarentegen kan men individuele gaswolkjes volgen, die zich langs de staart verplaatsen. De aldus waargenomen snelheden, 20-50 km per seconde, kloppen echter niet goed met de snelheden, nodig om de kromming van de staarten te verklaren.

De opvatting, dat de kometen licht geven door resonantie, biedt ons de mogelijkheid, te schatten hoeveel gas op elk punt van de koma of van de staart aanwezig is; hoeveel elk molecule verstrooit, kan uit laboratoriumproeven of theoretisch geschat worden; en we weten, dat de waargenomen lichtsterkte in elk punt rechtstreeks evenredig is met het totale aantal moleculen in de gezichtslijn. Men vindt aldus de massa van een komeet, die uiterst gering blijkt te zijn. In 1000 kubieke km van een komeetstaart is er minder materie dan in een vingerhoed gewone lucht. Het is nu begrijpelijk, dat een dergelijk hemellichaam geen merkbare storingen op planeten of satellieten kan uitoefenen.

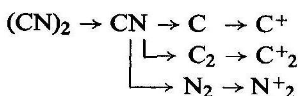
Voor iedere eigen trilling van de atomen en moleculen waaruit de komeet bestaat, moet zij het licht van de zon verstrooien; in het spectrum van kometen die dicht bij de zon komen, verschijnen inderdaad de natriumlijnen helder op donkere grond. Veel belangrijker zijn echter de lijnen van de moleculen, 'banden' vormend, die zich bij bepaalde golflengten verdichten.

Men bestudeert het spectrum op een van de volgende manieren: *1* Met

de kijker ontwerpt men het beeld van de komeet en zet de spleet van de spectrograaf op de plaats van dit beeld; deze methode is de beste om scherpe spectrumlijnen te verkrijgen. *2* Door het beeld van de komeet op te nemen met een gewone lichtsterke kijker, maar vóór het objectief een prisma te plaatsen (prismacamera); iedere monochromatische emissie van de komeet vormt een beeldje, men kan de beeldjes van de verschillende kleuren met elkaar vergelijken en waarnemen, hoe de lichtsoorten over de komeet verdeeld zijn. Op plaat 16 ziet men, dat sommige emissies alleen in de koma, andere alleen in de staart voorkomen. De voornaamste gassen die men heeft kunnen aantonen, zijn: in de koma: CN, C_2, C_3, NH, OH, CH, NH_2; in de staart: CO^+, N_2^+, CO_2^+, CH^+, en de 'verboden lijnen' van zuurstof [O], bewijzend dat de dichtheid uiterst gering moet zijn; zie ook plaat 17.

Dicht bij de zon verschijnen de oranje natriumlijnen en de 'verboden' lijnen van [O]; in één enkel geval heeft men ook lijnen van Fe en Ni waargenomen. De 'radicalen' of onverzadigde atoomgroepen kunnen op aarde niet in bestendige vorm bestaan, maar in sommige vlammen en ontladingen blijven ze toch voldoende lang in deze toestand om hun karakteristiek spectrum te vertonen. Doordat de gassen van de kometen zo uitermate ijl zijn, botsen de moleculen nooit tegen elkaar en ondervinden ze uitsluitend de invloed van het zonlicht en van de zonnewind, zodat de radicalen veel langer blijven bestaan.

Wij nemen aan, dat de moedermoleculen die uit de kern stromen, onder andere cyaan $(CN)_2$ bevatten en methaan CH_4, dezelfde gassen die ook uit meteorieten voor de dag komen, wanneer men ze in het laboratorium verhit. Men denkt ook aan CO_2, $(NH_2)_2$ en andere eenvoudige stoffen. Door het zonlicht en door botsingen met de snel bewegende atomen van de zonnewind ondergaan deze moleculen omzettingen van de volgende typen:



Deze moedermoleculen hebben zeer verschillende dampspanningen: de vluchtigste zouden allang verdwenen moeten zijn alvorens de minder vluchtige beginnen te verdampen. De hydraten van deze stoffen hebben echter dampspanningen die veel minder onderling verschillen, en zo zou men kunnen begrijpen dat zij, met hun afbraakprodukten, gelijktijdig voorkomen.

De overgang van de koma naar de staart geschiedt daar, waar de mole-

culen in meerderheid omgezet zijn in typische staartmoleculen. Aldus kan men inzien, waarom in het algemeen de kop van de komeet kleiner wordt, als dit hemellichaam tot de zon nadert: in de sterkere zonnewind hebben de moleculen een grotere kans op dissociatie en ionisatie, dus een kortere levensduur; ze worden eerder omgezet, dat wil zeggen: nadat ze een kortere weg hebben afgelegd (Wurm).

De detailstructuur van de moleculebanden in kometenspectra vertoont vele anomalieën. Deze zijn grotendeels te verklaren, als men bedenkt, dat de komeet tot lichtgeven wordt gebracht door de zonnestraling en dat deze een zeer bijzondere samenstelling heeft. De vele daarin voorkomende donkere fraunhoferlijnen immers hebben tot gevolg dat bepaalde moleculelijnen maar zwak aangeslagen worden, als de aanslagfrequentie toevallig met die van een fraunhoferlijn overeenstemt. Wanneer de komeet tot de zon nadert of zich ervan verwijdert, treedt dopplereffect op en verschuiven de fraunhoferlijnen ten opzichte van de moleculelijnen; inderdaad verandert hierbij de gehele intensiteitsverdeling in de moleculebanden, en wel volkomen in overeenstemming met wat de theorie deed vermoeden. Deze waarnemingen bevestigen op zeer fraaie wijze de opvattingen betreffende het aanslaan en lichtgeven van de komeetgassen (Swings, 1941; McKellar). Het onderzoek naar de intensiteitsverdeling in de moleculebanden leidt ook tot een bepaling van de temperatuur van de komeetgassen. Op een afstand van 1 astronomische eenheid van de zon heeft het cyaangas een temperatuur van 0° C, terwijl het C_2 de zeer veel hogere temperatuur van 3000° bereikt. Blijkbaar zijn er in die ijle materie zó weinig botsingen tussen de moleculen, dat een heet gas en een koud gas gemengd kunnen voorkomen, zonder dat de temperaturen zich vereffenen. De lage temperatuur van het CN is te begrijpen, daar de sterke infrarode straling van dit gas de opgenomen energie snel afvoert; het symmetrisch gebouwde molecule C_2 heeft die infrarode stralingen niet en bereikt dus een veel hogere temperatuur.

Het licht van de kometen is gepolariseerd. Bij komeet Cunningham bedroeg de polarisatiegraad van de C_2- en van de CN-banden 11 percent, in goede overeenstemming met hetgeen men zou verwachten bij verstrooiing door twee-atomige moleculen. Bij komeet Paraskevopoulos bereikte de polarisatie 24 percent; het spectrum vertoonde geen moleculebanden, de verstrooiing geschiedde hier blijkbaar door stofdeeltjes.

De *komeet van Halley* is de eerste waarvan de periodieke terugkeer aangetoond kon worden. De verschijningen ervan zijn vermeld in tal van historische bronnen, van 87 v. Chr. tot nu toe. De periode is gemiddeld 76 jaar, de komeet verwijdert zich tot iets voorbij de baan van Neptunus.

De *komeet van Encke* heeft de kortste periode van alle bekende kometen

(3,30 jaar). De omloopstijd ervan is duidelijk korter dan vroeger geworden, meestal geleidelijk veranderend, dan af en toe plotseling, telkens op ogenblikken waarop zij zich dicht bij haar perihelium bevond. Het is mogelijk, dat hier sprake is van de invloed van een weerstandbiedende middenstof die vooral in de nabijheid van de zon zou zweven; storingen ten gevolge van ontmoetingen met stromen meteorieten zouden echter ook een rol kunnen spelen.

De *komeet van Biela*, met een periode van 6,19 jaar, splitste zich eind 1845 onder de ogen van de waarnemers in twee componenten. Hun afstand nam geleidelijk toe tot 300 000 km. Bij de volgende terugkeer in 1852 was die afstand al gegroeid tot 2 000 000 km. Daarna is de komeet niet meer teruggezien, maar sedert 1872 vertoonden zich sterrenregens, drie maal, telkens als de aarde haar had zullen ontmoeten. Aan verscheidene andere kometen is waargenomen hoe zij zich oplosten (komeet Westphal; komeet 1926 III). De oorzaak moet worden gezocht in de aantrekkende werking van de zon op deze zeer ijle lichamen.

De *komeet van 1843* naderde de zon tot op 130 000 km van haar oppervlak, zonder dat een merkbare verzwakking van de komeet na de doorgang aangetoond kon worden. Deze komeet was tijdelijk bij volle dag zichtbaar; de staart bereikte een lengte van 250 miljoen km.

De *komeet van Donati* (1858 VI) ontwikkelde een brede, gebogen staart en twee ragscherpe, bijna rechtlijnige lichtbundels.

De *komeet van Schwassmann-Wachmann* (1925 II) is een van de betrekkelijk heldere kometen. De baan ervan heeft slechts een geringe excentriciteit, zij kan gedurende haar gehele loop gevolgd worden en bevindt zich tussen de banen van Jupiter en Saturnus. Deze komeet vertoont herhaaldelijk een opvallend, plotseling toenemen van de lichtsterkte, soms met een factor 100 en meer. Daarbij ziet men een soort nevel uitzetten met een snelheid van 100-200 m/sec. Het is de meest opvallende van dergelijke onregelmatig oplaaiende kometen: in dit geval, aangezien de baan bijna cirkelvormig is, kan verandering van de afstand tot de zon stellig geen rol spelen. De plotselinge lichtwisselingen ontstaan vermoedelijk als er zich in de kern scheuren vormen en gasbellen ineens vrijkomen.

De *komeet van Arend-Roland* (1957 III) vertoonde op bijzonder typische wijze de vorming van een zeer dunne, schijnbaar naar de zon gerichte staart. Feitelijk gaat het om een zeer dunne stoflaag, langs de baan van de komeet voorkomend en door de zonnewind in het baanvlak van de komeet naar buiten verspreid. Alleen op het ogenblik dat de aarde net door het baanvlak van de komeet gaat, werd deze verstrooiende laag zichtbaar (plaat 18). Hetzelfde heeft zich ook bij andere kometen voorgedaan.

De *komeet Mrkos* (1957 V) is ook een van de weinige heldere kometen van de laatste decennia. Opvallend is hier het gelijktijdig voorkomen van een stofstaart en van een gasstaart (plaat 19).

Ruimteonderzoek Reeds voor de nabije toekomst staan verscheidene onderzoekingen op het programma. Ten eerste het afvuren van raketten die op grote hoogte wolken CO_2, NH_3, H_2O ... uitstoten; men wil het spectrum onderzoeken van deze gassen, als ze buiten de dampkring door de zon bestraald worden, in de hoop daarin dezelfde radicalen te vinden als in de kometen en aldus te ontdekken welke de moedermoleculen zijn van de komeetgassen. Een eerste proef (1964) heeft aangetoond dat zich inderdaad uit ammoniak NH_2 vormt.

Ten tweede zou een blok ijs of vast kooldioxyde van enkele honderden kg enige tijd lang om de aarde kunnen cirkelen; in die tijd kan onderzocht worden of zich daaruit een komeetje ontwikkelt.

Ten derde mag het niet uitgesloten worden geacht dat men door een ruimteschip vlak langs een komeet te schieten, foto's van de kern zal verkrijgen en het spectrum van de moedermoleculen in het verre ultraviolet kan opnemen.

Aangezien voortdurend kometen uit het planetenstelsel door storingen verwijderd worden, terwijl de periodieke kometen onvermijdelijk langzamerhand moeten verdampen en uiteenvallen, moet men wel aannemen dat de door ons waargenomen kometen slechts een uiterst klein gedeelte vormen van een enorme wolk waarin talloze dergelijke hemellichamen rondzwerven. Deze zwerm moet zich ver buiten de planetenbanen uitstrekken, tot wel 200 000 A.E. (J. H. Oort). Door sterren die voorbijtrekken worden de kometenbanen voortdurend gestoord, zodat er telkens weer andere in de buurt van de zon komen en voor ons zichtbaar worden. Sommige daarvan kunnen door Jupiter zo zeer gestoord worden, dat ze elliptische banen met een korte omloopsduur gaan beschrijven en periodiek worden. De 'nieuwe' kometen, die voor het eerst in de nabijheid van de zon komen, en de 'oude' kometen zijn aan verschillende kenmerken te onderscheiden.

I.6.2 *Meteoren en meteorieten*

Allerlei grote en kleine gesteenten van kosmische oorsprong schieten door onze dampkring en trekken daarin een lichtspoor; de grootste bereiken de aarde.

Het is wel gebleken, dat men onderscheid moet maken tussen twee verschillende soorten objecten: enerzijds de kleine, los gebouwde meteoroïden, die de zwakke lichtstreepjes veroorzaken welke we meteoren noemen

(in de volksmond: 'vallende sterren'); ze zijn maar een speldeknop groot; in de zeldzame gevallen waarin ze een massa van de orde van 1 g bereiken, veroorzaken ze de lichtsterke vuurbollen of boliden. Anderzijds zijn er de meteorieten waarvan de val met veel helderder lichtverschijnselen gepaard gaat en die als steenachtige of metalen brokstukken op aarde neerkomen. Waarschijnlijk zijn de meteoroïden ontstaan uit uiteenvallende komeetkernen, de meteorieten integendeel uit planetoïden, die tegen elkaar botsen.

a Meteoren

De waarneming van meteoren is lange tijd alleen visueel geschied. Veel amateurs doen hier nuttig werk; er is een Werkgroep in de Nederlandse Vereniging voor Weer- en Sterrenkunde. Actief zijn verder de American Meteor Society; de Society for Research on Meteorites; de meteoor-afdelingen van het Sternberg Instituut te Moskou, van de British Astronomical Society, van de Tsjechische Astronomische Vereniging. Men tracht meteoren te tellen, de baan ervan op te tekenen, de snelheid ervan te schatten. Twee waarnemers, op een 50-tal km van elkaar verwijderd, die dezelfde vallende ster waarnemen en de baan zo goed mogelijk op een sterrenkaartje tekenen, bemerken dat de twee waargenomen banen verschoven zijn ten opzichte van elkaar. Uit die verschuiving kan de hoogte worden berekend. Men vindt dat de meeste vallende sterren op hoogten van 110 km beginnen licht te geven, en op 80 of 70 km doven; voor de langzamer bewegende geschiedt het oplichten lager. Het veelvuldigst ziet men meteoren tussen 4 uur en 6 uur 's ochtends.

Veel betrouwbaarder dan de visuele methode is de fotografische waarneming gebleken. Men werkt met twee camera's, ongeveer 50 km van elkaar verwijderd en naar hetzelfde punt van de hemel gericht; uit de parallactische verschuiving kan men de afstand en dus de plaats van de meteoorbaan in de ruimte aangeven. Vóór het objectief van de camera laat men een sector draaien, die 10 of 20 maal per seconde het licht onderbreekt. De gefotografeerde baan ziet er dus uit als een stippellijn: uit de onderbrekingen kan men nauwkeurig uitmeten. hoe snel de meteoor bewoog en zelfs hoe de snelheid geleidelijk afgenomen is door de remming van de dampkring. Normale resultaten zijn bijvoorbeeld een snelheid ten opzichte van de aarde van 33 km/sec en een vertraging van 3 km/sec^2. Een speciale lichtsterke camera voor zulke waarnemingen is de super-Schmidtcamera met een veld van 55° en een zeer grote lichtsterkte (plaat 20).

Bijzonder effectief is het waarnemen van meteoren met radar (Radiosterrenwacht Jodrell Bank; Ottawa). Het verdampende korreltje laat een

spoor achter van geïoniseerde damp, dat de radargolven terugkaatst. Men zendt dus voortdurend korte radarflitsen uit en neemt de echo's waar. Het gelukt, zowel de afstand en de richting als de sterkte en de duur van elke meteoor te bepalen, zelfs de snelheid en de radianten kunnen gevonden worden. Aldus onderscheidt men nog veel zwakkere meteoren dan het oog of de fotografische plaat kunnen opvangen. De methode kan ook overdag gebruikt worden: er zijn verscheidene dagradianten gevonden waarvan het bestaan niet vermoed was. De waarnemingen kunnen zelfs bij volkomen bewolkte lucht ongestoord uitgevoerd worden.

Bij de meteoroïden, evenals bij andere kosmische objecten van onbekende oorsprong, is het van groot belang, uit te maken, of ze in onze dampkring komen met snelheden groter of kleiner dan de parabolische snelheid van 42 km/sec; dit beslist erover, of ze tot ons zonnestelsel behoren of niet. Om dit in te zien, bedenken we, dat een voorwerp dat van het oneindige uit naar de zon valt, geleidelijk kinetische energie wint; evenveel neemt zijn potentiële energie af; en net zo groot is ook de arbeid, vereist om het lichaam weer naar het oneindige te vervoeren tegen de gravitatie in. Voor een punt dat de afstand R van de zon heeft bereikt, is deze arbeid

$$\int_R^\infty G\frac{Mm}{r^2}\,\mathrm{d}r = G\frac{Mm}{R}$$

(M = massa van de zon, m = massa van het lichaam). Aangezien dit arbeidsvermogen overgegaan is in kinetische energie, volgt dat:

$$\tfrac{1}{2}\,mv^2 = G\frac{Mm}{R};\ \text{dus}\ v = \sqrt{\frac{2GM}{R}}.$$

Een meteoriet die tot het zonnestelsel behoort en geen merkbare baanbeweging zou hebben ten opzichte van de zon, wordt in hoofdzaak *door de zon* aangetrokken en valt naar dit hemellichaam; op het ogenblik waarop hij de aardbaan doorkruist, heeft hij volgens de hierboven afgeleide formule een snelheid van 42 km/sec bereikt. Een grotere snelheid zou erop wijzen, dat de meteoriet reeds een merkbare beginsnelheid had, toen hij zijn val begon, en dat hij dus oorspronkelijk niet tot het zonnestelsel behoorde. Lange tijd heeft men gedacht, dat de snelheid van de meteoroïden die de aarde ontmoeten, deels beneden, deels boven deze 42 km/sec lag. De moderne fotografische resultaten bewijzen wel dat alle behoorlijk waargenomen banen een kleinere snelheid vertonen (Whipple, 1950 en later).

Men moet dus de meteoroïden evenals de kometen tot permanente bewoners van het zonnestelsel rekenen. Zeer veel arbeid is besteed aan

het statistisch bewerken van grote reeksen waarnemingen, van de aantallen meteoren voor elke gegeven richting, helderheid, hoogte van oplichten en uitdoven enzovoort. Per dag vallen er ongeveer 100 miljoen meteoren die met het blote oog zichtbaar zijn; hun totale massa bedraagt ongeveer 1000 ton per dag, rekening houdend ook met de allerfijnste en langzame stofjes.

Sommige nachten ziet men een ongewoon aantal meteoren; men spreekt dan van een 'regen van vallende sterren', of sterrenregen. Zet men zo precies mogelijk hun banen uit op een hemelglobe of sterrenkaart, dan bemerkt men dat de meeste van deze banen van één punt schijnen uit te stralen: de radiant. Dit is louter een gevolg van perspectief: zoals spoorrails en telegraafdraden naar een punt op de gezichtseinder schijnen te convergeren, maar in werkelijkheid evenwijdig zijn, zo moeten ook deze meteoorbanen toegeschreven worden aan stofjes die zich als een stroom volgens evenwijdige banen door de ruimte bewegen. Ook op dagen waarop de gewone waarnemer niets bijzonders opmerkt, behoort 50% van de meteoren tot de vaste radianten; dit zijn de zwermmeteoren. Ze worden meestal benoemd naar het sterrenbeeld waar zich de radiant bevindt; men spreekt van Perseïden, Leoniden enzovoort. Daarnaast zijn er ook sporadische meteoren, die men niet tot een zwerm rekent, maar die vermoedelijk overblijfsels zijn van sterk verspreide, gestoorde of schaars bevolkte zwermen. Zelfs in de dichtste sterrenregens bevindt er zich gemiddeld slechts één speldeknopje materie in een volume van 10 miljoen kubieke km.

Van de thans bekende 220 radianten worden de belangrijkste genoemd in de tabel op blz 80.

Uit de richting van de radiant en de snelheid van de meteoren kan men de baan van de zwerm reconstrueren. Men vindt een langgerekte ellips die op een bepaald punt de aardbaan snijdt; soms vormt het baanvlak een grote hoek met de ecliptica. Het merendeel van de meteoorstromen beweegt echter in dezelfde zin als de aarde en de planeten, in banen die weinig hellen ten opzichte van de ecliptica. Er bestaat stellig een nauw verband tussen meteoroïden en kometen. Dit verband was al waarschijnlijk gemaakt, toen de komeet van Biela verdween, terwijl men een sterrenregen zag op het ogenblik dat de aarde later haar baan doorkruiste. In een aantal gevallen is aangetoond, dat de radiant van een meteoorzwerm nauwkeurig samenvalt met de baan van een komeet. We moeten ons dus voorstellen, dat de gesteenten langs de gehele baan of langs een deel van de baan van de komeet verspreid zijn en dat enkele van de grootste blokken de kern vormen, waaruit de kometengassen ontsnappen. In het

TABEL: ENKELE METEOORZWERMEN

naam	*maximum*	*bijbehorende komeet*
Quadrantiden	3 januari	--
η-Aquariden	5 mei	Halley
Draconiden	28 juni	Pons-Winnecke
Perseïden	11 augustus	1862 III
Okt.-Draconiden	9 oktober	Giacobini-Zinner
Orioniden	20 oktober	Halley
Tauriden	13 november	Encke
Leoniden	16 november	1866 I
Geminiden	13 december	--

geval van de Perseïden, bijvoorbeeld, weten we, dat er aantallen meteoren gezien worden, telkens als de aarde hun baan kruist, en vrijwel elk jaar evenveel; we moeten dus aannemen, dat de gesteenten gelijkmatig over de baan verspreid zijn. In het geval van de Leoniden namen we in de 19de eeuw alle 35 jaar fraaie sterrenregens waar (in de 20ste eeuw zijn de Leoniden pas in 1965 en '66 weer verschenen), maar enige jaren daarvóór en daarna zien we de frequentie van de meteoren eerst toenemen, daarna afnemen. De gesteenten zijn dus het veelvuldigst dicht bij de komeet, maar zijn begonnen zich vandaaruit langs de baan te verspreiden. Bij de Tauriden zijn de gesteenten niet alleen gelijkmatig langs de baan verdeeld, maar ook zijn hun banen ten gevolge van allerlei storingen reeds merkbaar onderling gaan afwijken. Dit is het verste stadium van de uiteenrafeling.

Plaat 15 Saturnus met ringenstelsel. Opname Mt. Wilson Observatory.

Plaat 16 Spectrum van de komeet van Halley. De horizontale lichtstrepen zijn spectra van sterren. Links in de kop: λ 3883 (CN); daarop volgen drie emissies van CO^+ in de staart. Opname door Slipher met een prismacamera.

Plaat 17 Detail van een komeetspectrum, opgenomen met een spleetspectrograaf van grote dispersie; λ 3850 — λ 6300 Å. Aan beide zijden ziet men het vergelijkingsspectrum. Opname Swings, McDonald Observatory.

Uit de bestudering van de banen van de meteoren kan men belangwekkende inlichtingen verkrijgen omtrent onze dampkring op een hoogte van 100 km. Hiertoe dient men eerst te begrijpen, hoe het lichtgeven ontstaat. Het blijkt, dat korreltjes van 2 mm middellijn reeds voldoende zijn om als meteoren gezien te worden. Als ze in onze dampkring binnendringen, hebben ze snelheden van vele km/sec; ze worden dus getroffen door een hagel van luchtmoleculen, ze verdampen en de dampwolk om het korreltje wordt tot lichten gebracht. Heldere meteoren vertonen meestal een nalichtend spoor dat gedurende verscheidene minuten zichtbaar kan blijven, soms een half uur en langer. Het bevindt zich meestal op een hoogte van 85 km. Men kan dan waarnemen, hoe het oorspronkelijk scherpe, rechte spoor snel breder wordt door diffusie, en daarna golven en bochten gaat vertonen: een bewijs voor het voorkomen van windgradiënten en turbulentie in de hoge dampkring. Aan dergelijke meteoorsporen en ook aan die van veel zwakkere meteoren worden de radargolven teruggekaatst, ten gevolge van de sterke daarin voorkomende ionisatie die dikwijls een paar seconden lang aanhoudt. De toestand van de lucht in de nabijheid van een grote meteoriet moet uiterst interessant zijn; deze lucht kan niet tijdig uitwijken, wordt samengeperst en bereikt een zeer hoge temperatuur. Een knalgolf vergezelt de meteoriet op zijn vlucht, zoals de golf die een kogel begeleidt; in de buurt van het eindpunt hoort men een lang aanhoudend gerommel met enkele luide knallen.

Het spectrum van de meteoren wordt alleen nu en dan door een toeval verkregen. Wanneer de astronoom met de prismacamera spectra van sterren opneemt, gebeurt het een enkele maal dat een heldere meteoor door het gezichtsveld flitst en zijn spectrum op de plaat achterlaat. Een vergelijking van de aldus verkregen opnamen leert dat men, behalve de lijnen van stikstof uit de dampkring, steeds de lijnen ziet van Na, Mg, Ca, Fe; zeldzamer zijn Cr en Mn. Hoe groter de snelheid, des te meer geïoniseerde atomen en des te hoger de aanslag. De samenstelling van de gassen schijnt overeen te komen met die van de steenmeteorieten.

Plaat 18 Komeet Arend-Roland, op het ogenblik dat de aarde door het baanvlak ging: 25 april 1957. Opname Å. Wallenquist, Uppsala.

Plaat 19 Komeet Mrkos. De plasmastaart is recht van de zon af gericht, scherp, turbulent. De stofstaart buigt sterk af en is wazig. Opname M. Dufay, Haute-Provence, 22 augustus 1957.

Plaat 21 Fossiel organisme (?) in een koolstofmeteoriet. Opname G. Claus, New York. Vergroting ongeveer duizend maal.

Uit de theorie van het lichtgeven en de waarneming van de banen is afgeleid, dat vele meteoorsporen worden veroorzaakt door een zeer poreus gesteente en losgebouwde korrels, vermoedelijk brokstukjes van komeetkernen. Het soortelijk gewicht van deze meteoroïden is meestal slechts 0,2. Hun massa varieert van 10^{-5} tot 10^{2} gram. De meteorieten, die de aarde bereiken als stukken stevig gesteente of metaal, zijn daarentegen afkomstig van de planetoïden die dikwijls elkaar ontmoeten en botsen of langs elkaar schuren.

b Meteorieten

De meteorieten worden bij hun vlucht door de dampkring uitsluitend in het dunne oppervlaktelaagje verhit en richten bij het vallen slechts weinig schade aan. Soms komen ze neer in zwermen van honderden of duizenden stenen. Werkelijke ongelukken zijn zelden door meteorieten aangericht. In 1943 werd een aantal huizen vernield in de hoofdstraat van Carhuamayo (Peru). Op enkele punten van de aardbol vindt men grote holten waarvan de vorming geologisch niet te verklaren is en waarvan men wel met zekerheid mag aannemen dat het inslagplaatsen van grote meteorieten zijn. De meest bekende van die meteorietkraters is de grote krater in Arizona, die een middellijn heeft van 1200 m en een diepte van 174 m. Niettegenstaande alle moeite is het niet gelukt de meteoriet zelf terug te vinden, al zijn grote hoeveelheden schilfers meteoriet-ijzer in de omgeving aangetroffen.

Men onderstelt, dat bij meteorieten groter dan 1 m de luchtwrijving zo gering is ten opzichte van het gewicht, dat de steen met een ontzaglijke vaart aankomt en door de plotselinge remming met een geweldige ontploffing in damp wordt omgezet. Zo vormen zich de echte ontploffingskraters. Men kan dus begrijpen, dat er nergens meteoorstenen worden gevonden van meer dan een paar meter middellijn. Daarnaast zijn er ook kleinere indeukingskraters, gevormd door minder zware meteorieten. Andere meteoorkraters bevinden zich te Henbury (Australië), Wabar (Arabië), in Noord-Canada, op het eiland Saarema (Estland), enzovoort; er zijn er ruim 150 bekend en geregeld wordt er nog wel een nieuwe ontdekt. Op 30 juli 1908 kwam een groot gevaarte neer in de verlaten vlakten van de Podkamjennaja Toengoeska (Siberië), een ontzettende verwoesting aanrichtend in de omringende wouden tot op een afstand van 50 km, meer dan 200 grote kuilen in de grond makend; ook hier is geen meteoorsteen teruggevonden (expedities van Koelik en Krinow). Er zijn redenen om aan te nemen, dat in dit geval geen echte meteoriet, maar de kern van een kleine komeet neergekomen is. Op 12 februari 1947 is er opnieuw een grote meteoor neergekomen in Siberië, met soortgelijke verschijnselen,

ditmaal te Sichote-Alin; er is 23 ton meteorietisch materiaal gevonden, er werden 24 indeukingskraters gevormd, 167 inslagtrechters.

Gemiddeld vallen er 19 steenmeteorieten tegen 1 ijzermeteoriet, maar de eerste breken en verweren snel, de ijzermeteorieten zijn ook gemakkelijker te herkennen.

Slechts van 3 meteorieten zijn voldoende gegevens bekend om hun baan te kunnen afleiden. Alle drie blijken zij afkomstig uit de planetoïdengordel. Men neemt aan dat dit algemeen geldt en dat meteorieten ontstaan zijn uit tegen elkaar botsende planetoïden. Dat ze van de maan afkomstig zouden zijn, is nu wel weerlegd, sedert we de samenstelling van de maangesteenten kennen.

De grootste bekende meteorieten zijn die van Hoba, in Zuidwest-Afrika (60 ton); die van Kaap York (Groenland, 50 ton), thans te New York; die van Bacubirito (Mexico, 25 ton). Dit zijn alle ijzermeteorieten. Een aantal kleinere objecten wordt in de geologische musea over de gehele wereld bewaard. De op aarde neervallende meteorieten zijn de enige stukken materie die uit de kosmos afkomstig zijn en die we rechtstreeks kunnen onderzoeken. De chemische analyse toont aan, dat ze bestaan uit dezelfde elementen die we op aarde en in de sterren kennen. De mineralen echter die zich uit die elementen hebben gevormd, waren gedeeltelijk onbekend. Kwarts en mica ontbreken; ook vindt men geen spoor van sedimentaire gesteenten. Nieuw zijn bijvoorbeeld het oldhamiet (CaS), moissaniet (SiC), lawrenciet ($FeCl_2$). Het voorkomen van magnetisering in meteorieten bewijst dat zij zijn ontstaan in vrij grote moederlichamen met eigen magneetveld.

Aan de meteorieten zijn nauwkeurige ouderdomsbepalingen uitgevoerd (zie deel 2, I.7.1).

De indeling der meteorieten is aangegeven in onderstaande tabel:

TABEL: INDELING VAN DE METEORIETEN

Steenmeteorieten:	
	chondrieten
	achondrieten
Steen-ijzer-meteorieten (pallasieten, mesosiderieten)	
IJzermeteorieten:	
	oktaëdrieten
	hexaëdrieten
	ataxieten
Tektieten	

De meeste steenmeteorieten (chondrieten) zijn op merkwaardige wijze opgebouwd uit korrels van olivijn of pyroxeen (chondren), die afmetingen hebben van enkele mm tot honderdsten daarvan; een dergelijke structuur komt bij aardse gesteenten niet voor. Bijna alle chondrieten hebben dezelfde elementaire samenstelling, vermoedelijk overeenkomend met de verhouding van de verschillende atoomsoorten in de nevel waaruit zich het planetenstelsel heeft ontwikkeld.

Bijzonder belangwekkend zijn de zeldzame koolstofhoudende chondrieten, waarin water is aangetroffen en 7 percent organische stoffen. Een klein deel (een half percent van de meteorietmassa) bleek oplosbaar en bevatte organische moleculen van vrij ingewikkelde bouw (vetzuren, porphyrinen, ontstaan in levende wezens?). Thans is het gelukt nog 2 percent meer in oplossing te brengen, hetgeen belangrijke resultaten belooft. In elk geval zijn deze koolstofmeteorieten van buitenaardse oorsprong, want hun gehalte aan deuterium en C^{13} is duidelijk afwijkend. Onder de microscoop heeft men structuren waargenomen, die door sommige onderzoekers als fossiele organismen of fossiele sporen worden beschouwd! Zie plaat 21.

De achondrieten zijn zeldzaam. Bij de steen-ijzer-meteorieten komen de silicaten als korrels voor te midden van een nikkelijzermassa.

De ijzermeteorieten bevatten alle een zekere hoeveelheid nikkel, variërend van 5 tot 15 percent, zelden meer. Door het voorzichtig etsen van de doorsnede van vele ijzermeteorieten (oktaëdrieten) ziet men de figuren van Widmannstätten verschijnen; een netwerk van donkere, rechte lijnen op lichtere grond: doorsnede van lamellen evenwijdig aan de vlakken van oktaëdervormige kristallen, zoals wij ze in ijzermineralen op aarde nooit aantreffen (plaat 22). Ze moeten zich gevormd hebben door zeer langzaam uitkristalliseren gedurende duizenden jaren bij temperaturen van 350°-580° C; bij 900° verdwijnt de structuur geheel. De hexaëdrieten vertonen geen figuren van Widmannstätten, maar een fijne, evenwijdige streping. De ataxieten zijn meteorieten die waarschijnlijk door verwarming hun structuur hebben verloren.

Tectieten gelijken op knollen van donkergroen vulkanisch glas, maar bevatten geen water. Men treft ze in grote hoeveelheden aan in vier grote velden, elk met een eigen geologische ouderdom overeenkomend: het indo-australische gebied (0,7 miljoen jaar), West-Afrika (1,3 miljoen jaar), Moldavië (15 miljoen jaar), Noord-Amerika en Libië (34 miljoen jaar). De oorsprong van deze gesteenten was lange tijd onzeker, maar wordt thans wel als meteorietisch beschouwd.

Men vermoedt dat het stof dat neerslaat uit de dampkring, bestanddelen bevat, die afkomstig zijn uit de wereldruimte en overblijfselen zijn van

kleine meteoordeeltjes. Deze micrometeorieten zijn microscopische ijzerkorreltjes, zo klein (enkele microns of minder), dat de warmte die zich ontwikkelt wanneer zij door de dampkring vliegen, ogenblikkelijk wordt afgevoerd; ze verdampen dan ook niet en vormen op zijn hoogst een gesmolten druppeltje. Een dergelijke oorsprong wordt ook toegeschreven aan bepaalde bestanddelen van het rode diepzeeslik.

16.3 *Het zodiakale licht en de interplanetaire ruimte*

Men ziet het zodiakale licht als een lichtschijn in de ecliptica, die het helderst is nabij de zon en die verder daarvandaan zwakker en zwakker wordt. Hij vertoont zich tegen de achtergrond van een goed donkere hemel, bij voorkeur na zonsondergang in de lente, of vóór zonsopgang in de herfst. Bij goede waarnemingsomstandigheden kan men hem langs de gehele ecliptica volgen. Aan de zijde tegenover de zon is er een geringe toeneming van de helderheid: 'Gegenschein' of oppositielicht, een zeer lichtzwak en moeilijk waar te nemen object. Men is erin geslaagd de helderheidsverdeling in het zodiakale licht met fotocellen objectief te meten en het oppositielicht aan te tonen. Het is nodig de waargenomen lichtverdeling te bevrijden van alle toevoegingen van schemeringslicht, nachthemellicht enzovoort.

Dit lichtschijnsel is te wijten aan de verstrooiing van het licht door uiterst ijl verdeelde stofjes en door het gas in de interplanetaire ruimte; over de verhouding tussen beide bestanddelen is nog geen zekerheid verkregen. De stofjes zijn de talloze meteoroïden en micrometeorieten die in het planetenstelsel voorkomen, blijkbaar een grote lensvormige wolk vormend, ongeveer in het vlak van de ecliptica, of juister: in het onveranderlijke vlak. Naar buiten wordt de wolk geleidelijk ijler. In de directe omgeving van de zon kunnen stofjes niet voorkomen: daar zouden ze te heet worden en verdampen. De witte kleur van het zodiakale licht bewijst dat de verstrooiende stofjes niet zeer klein kunnen zijn (groter dan één micron).

Men zou verwachten dat deze stofjes door de naar buiten stromende zonnestraling en door de zonnewind meegesleept worden. Er is echter een verrassend effect, het Poynting-Robertson-effect (1903-1937), dat in tegenstelde zin werkt en overweegt. Ook als regendruppels zuiver verticaal vallen, laten ze immers schuine sporen achter op een treinruit; en wie in de regen loopt, voelt zijn gezicht nat worden. Evenzo zal een stofje, ook als het in een cirkelbaan zuiver dwars op de zonnestraling beweegt, toch een bepaalde tegenkracht ondervinden, waardoor het geremd wordt, energie verliest en in een spiraalbaan tot de zon nadert. De tijd die nodig is om de zon te bereiken, is van de orde van 10^5 jaar voor korreltjes van

een halve millimeter en neemt toe evenredig met de afmeting ervan. Terwijl dus voortdurend nieuwe meteoroïden ontstaan, gaan er ook evenveel verloren.

Het gas is niets anders dan het buitenste gedeelte van de zonnecorona die zich tot voorbij de aarde uitstrekt. De corona heeft een hoog warmtegeleidingsvermogen en is zelfs op deze geweldige afstand van de zon nog zó heet, dat zij voortdurend naar buiten uitstroomt. Zij bestaat in hoofdzaak uit geheel geïoniseerde waterstof, het is dus een plasma van protonen en elektronen. Deze zonnewind heeft op aardafstand een dichtheid van 2-10 deeltjes per kubieke centimeter en een stroomsnelheid van ongeveer 350 km/sec; bij storingen op de zon worden de dichtheid en de snelheid groter. Tevens worden magnetische velden meegevoerd, van de orde van enkele gamma (1 gamma = 10^{-5} oersted). Het is de zonnewind die de gesteenten op de maan doet verkleuren, die de magnetische krachtlijnen van de aarde doet ombuigen en de magnetosfeer begrenst en die de staart van de kometen meesleept. Hij doet zich stellig nog tot 5 A.E. van de zon gevoelen, wellicht nog verder.

Bij storingen op de zon stromen nog andere bundels geladen deeltjes door de interplanetaire ruimte. *1* De zwakke stromen atoomkernen van geringe energie (enkele MeV) vergezeld van elektronen, afkomstig van de M-gebieden op de zon, die magnetische stormen veroorzaken, de poollichten teweegbrengen en de buitenste stralinggordels aanvullen. Ze bewegen precies langs de interplanetaire krachtlijnen. *2* De zeer energierijke atoomkernen (van de orde van 100 MeV = 10^8 eV) en elektronen, afkomstig van sterke zonnevlammen; zij bereiken ons reeds 10 à 20 minuten nadat we de zonnevlam hebben waargenomen, en lopen dus met snelheden tot 100 000 km/sec. Men spreekt van 'kosmische straling' (maar dan van solaire oorsprong). Nog vele uren lang daarna blijven deeltjes instromen, die verstrooid zijn door de onregelmatige magnetische velden in de interplanetaire ruimte. Daarnaast is er dan nog de eigenlijke kosmische straling, die uit de diepten van de wereldruimte komt, de snelheid van het licht benadert, en waarin energieën gemeten zijn tot 10^{20} eV. Ze komen gelijkelijk van alle kanten, maar worden door het aardveld naar bepaalde breedte-intervallen afgebogen.

De interplanetaire ruimte, vroeger als ledig beschouwd, vertoont dus een grote verscheidenheid van stofkorrels, geladen deeltjes, magnetische velden en straling – van de kortgolvige röntgenstraling tot de lange radiogolven.

In 1961 ontdekte de Poolse onderzoeker Kordylewski twee wazige, flauw-lichtende, enkele graden grote wolken nabij het libratiepunt L_5 van het stelsel aarde-maan; later vond hij die ook nabij het libratiepunt L_4;

vergelijk de Trojanen in het stelsel zon-Jupiter; deel 2, I.1.6 en afbeelding 25. Het zijn verzamelingen meteoroïden, die evenals het zodiakale stof door de zon worden verlicht, en die evenals de maan en in dezelfde baan om de aarde draaien. Deze ontdekking werd in 1966 bevestigd door Simpson en Miller van de Lockheed laboratoria. In 1966 vond Kordylewski zelfs aanwijzingen voor een gordel meteorietstof langs de gehele maansbaan.

I.7 ONTSTAAN EN VERGAAN; TOEKOMSTDROMEN

I.7.1 *Hoe ontstond het planetenstelsel?*

De merkwaardige regelmaat in de bewegingen en eigenschappen van de planeten en satellieten voert vanzelf tot de vraag: hoe is dit stelsel ontstaan? Er is geen twijfel aan, dat deze oorsprong volkomen begrijpelijk te maken moet zijn en dat hij geheel moet berusten op de toepassing van bekende mechanische en natuurkundige wetten. Tot nu toe is het echter nog niet gelukt een geheel bevredigende theorie te ontwerpen, die de toets der berekening doorstaat. De kosmogonie is inderdaad een van de moeilijkste en minst zekere hoofdstukken van de sterrenkunde. Er bestaan stellig nog allerlei mogelijkheden, die wij nog niet voldoende hebben onderzocht. De meeste theorieën kunnen worden herleid tot twee grote groepen.

1 Monistische theorieën. Hierbij wordt aangenomen dat de planeetvorming door een natuurlijk evolutieproces van de zon geschied is, zonder tussenkomst van andere hemellichamen.

Volgens de theorie van Kant (1755) ontstaat ergens in een grote gasnevel een toevallige verdichting, de zon. Alle overige deeltjes worden naar dat centrale lichaam getrokken; maar daarbij botsen ze tegen elkaar en beginnen in alle richtingen banen te beschrijven. Ook nu gaan de botsingen door, en wel zolang tot er slechts een klein aantal planeten overblijft, dat cirkels beschrijft in eenzelfde omloopsrichting.

Bij de theorie van Laplace (1796) vertoont de oorspronkelijk gloeiende, zeer uitgestrekte gasnevel reeds bij de aanvang een langzame aswenteling. Als hij door afkoeling samentrekt, neemt de omwentelsnelheid toe, de materie nabij de evenaar maakt zich los en vormt een ring. De nevelmassa trekt verder samen, de rotatie wordt weer sneller, er ontstaat een tweede ring enzovoort. Deze ringen zullen zich in het algemeen tot planeten verdichten.

Een van de grootste bezwaren tegen alle monistische theorieën was steeds het feit dat de zon 99 percent van de massa van het gehele stelsel

omvat, terwijl zij slechts één percent bevat van het impulsmoment, het produkt *mvr*, over alle volumedeeltjes gesommeerd.

2 Dualistische theorieën. Ditmaal wordt aangenomen, dat het planetenstelsel ontstaan is door een oorzaak buiten de zon. Jeans (1929) denkt aan de voorbijgang van een andere ster, dicht langs de zon. Men kan vrij nauwkeurig berekenen hoe zulk een passage zou geschieden: de twee hemellichamen zwaaien om elkaar heen en daarbij wordt door de aantrekkingskracht een sliert zonnematerie losgerukt – enigszins zoals de zee onder de invloed van de maan zich tot een vloedberg verheft, maar nu op geweldige schaal. Deze sliert condenseert zich dan om bepaalde punten en vormt een reeks bollen: de planeten. – Jeffreys denkt veeleer aan een echte botsing van de vreemde ster met de zon.

Vrijwel alle moderne opvattingen zijn monistisch, zij het ook met allerlei varianten. Een nevel van gas en stof trekt zich samen, vormt de zon en gaat daarbij sneller en sneller draaien. Er vormt zich een nevelschijf die condenseert tot korrels welke verder aaneengroeien tot planeten; misschien hebben zich eerst nog lichamen gevormd, gelijkend op planetoïden of op de maan. Uit dit stelsel ontwijken waterstof en helium, uit de binnenste delen zelfs een groot deel van de koolstof, stikstof en zuurstof. Voor wat betreft de wijze waarop dit alles geschied is, maakt men thans gebruik van allerlei nieuwe fysische begrippen, zonder dat men zeggen kan dat eenstemmigheid daaromtrent verkregen is. In de nevelschijf bestudeert men de grote, regelmatige wervels (Von Weizsäcker), de onregelmatige turbulentie (Kuiper) of de vorming van ringen (Berlage). Ter verklaring van het feit dat de zon zo'n groot gedeelte van de massa en toch zulk een klein gedeelte van het rotatiemoment bevat, neemt men aan dat zij door haar magneetveld gekoppeld was met de omgevende nevel, hetgeen haar rotatie heeft geremd. Het afwijkende gehalte aan sommige isotopen kan verklaard worden, als de aaneengroeiende lichamen bestraald zijn door bundels protonen en neutronen uit toenmaals zeer krachtige zonnevlammen (Hoyle, Fowler). Door bestudering van de chondriet-meteorieten tracht men zich een beeld te vormen van de inwendige samenstelling van de oudst gevormde planetoïden (Urey). De planetoïden en planeten waren aanvankelijk koud; zij zijn echter verhit door de inslag van de verder aaneengroeiende deeltjes, of door chemische reacties, en door de radioactiviteit van de gesteenten.

In deze ontwikkelingsgeschiedenis kan men verscheidene vaste punten aangeven, waardoor de tijdsduur van de verschijnselen wordt bepaald. De gegevens hiervoor levert de radioactiviteit van de gesteenten, die zich met grote wetmatigheid heeft afgespeeld, onafhankelijk van druk, temperatuur of andere omstandigheden. De oudste bekende gesteenten op

aarde zijn ruim drieduizend miljoen jaar oud; deze gesteenten zijn zelf opgebouwd uit de afbraak van nog oudere gesteenten. Alles wijst erop dat de aarde zo'n 4500 miljoen jaar geleden ontstaan is. Dit is ook de ouderdom die voor de meteorieten is gevonden. Het planetenstelsel moet toen als geheel ontstaan zijn.

Vroeger werd aangenomen dat de maan zich door deling van de aarde heeft afgesnoerd (G. H. Darwin). Later is deze opvatting bestreden (Jeffreys); men meende dan dat de aarde en de maan onafhankelijk van elkaar waren ontstaan als een dubbele planeet; of dat de maan van elders was gekomen en door de aarde gevangen (Gerstenkorn). Thans wordt toch weer aan de opvatting van Darwin gedacht, zij het in gewijzigde vorm (Wise). In ieder geval heeft de maan zich 2.10^9 jaar geleden veel dichter bij de aarde bevonden dan thans. Sedertdien heeft een langzame evolutie van dit stelsel plaatsgevonden: de maan immers verwekt de getijden van de oceanen en van de 'vaste' aarde zelf, de aarde moet onder die opgehoogde 'vloedbergen' doordraaien en ondervindt wrijving, dus remming (zie deel 2, I.1.9). Deze verlangzaming van de aardrotatie is zelfs in het korte tijdsbestek der historische tijden al merkbaar: de dag wordt elke eeuw 0,001 seconde langer. Omgekeerd echter wordt de maan door hetzelfde proces versneld; daarmee gaat gepaard dat ze zich van de aarde verwijdert en wel 1,5 meter per eeuw. Het proces zal blijven doorgaan totdat de rotatie van de aarde geheel geremd is en dit hemellichaam steeds dezelfde zijde naar de maan keert – op dat ogenblik zullen 'dag' en 'maand' gelijk zijn geworden. Een dergelijke remming van de rotatie heeft de maan zelf door plastische vervorming al veel vroeger ondergaan; vandaar dat ze steeds dezelfde kant naar de aarde keert.

Er is een aantal methoden om de ouderdom van meteorieten te bepalen; deze methoden berusten alle op de radioactiviteit van de atomen. Meestal gaat men uit van de onderstelling dat de meteorieten gevormd zijn in een of meer moederlichamen, bijvoorbeeld planetoïden met een middellijn van de orde van vijfhonderd kilometer, ontstaan uit het aaneengroeien van stofkorrels van de zonnenevel. Deze hemellichamen zouden eerst door de radioactiviteit van de gesteenten verhit zijn tot bij het smeltpunt. Daarbij zouden de ijzerbestanddelen zich van de silicaten hebben afgescheiden. (Vergelijk de ijzer-nikkelkern in het inwendige van de aarde.) Kort daarop moeten deze planetoïden gestold zijn. Doordat hun banen enigszins elliptisch waren, botsten zij af en toe tegen elkaar, en zo ontstonden de brokstukken die soms op de aarde neerkomen als meteorieten. Met de uranium-loodmethode en andere radioactieve methoden wordt gevonden, dat de stolling 4,6 miljard jaar geleden plaatshad. Verder vindt men in de buitenste lagen van de meteorieten sommige isotopen die alleen

onder invloed van de kosmische straling kunnen zijn ontstaan, nadat het moederlichaam gebarsten was en de meteorieten vrij in de ruimte hebben gezweefd. Uit het gehalte aan deze isotopen blijkt, dat de meeste ijzermeteorieten sedert tweehonderd tot zeshonderd miljoen jaar aan de kosmische straling zijn blootgesteld, de steenmeteorieten sedert twintig tot zestig miljoen jaar (*stralingsleeftijd*). Voor de ouderdom van de tectieten heeft men getallen gevonden tussen zevenhonderdduizend jaar en 34 miljoen jaar; ze zijn dus veel jonger dan de gewone meteorieten.

I.7.2 *Limiet van Roche*

In vele beschouwingen over de evolutie van het planetenstelsel neemt het begrip: *limiet van Roche* een belangrijke plaats in. Het blijkt namelijk dat een planeet met straal R geen satellieten kan hebben op afstanden kleiner dan $2R$ ongeveer van het centrum. De getijkrachten, die evenredig zijn met $1/R^3$, worden binnen deze grens zo sterk, dat ze gaan overwegen boven de onderlinge aantrekking, die de delen van de satelliet samenbindt; de satelliet wordt daardoor uiteengerukt (zie deel 2, I.1.9). Als de planeet en de satelliet een verschillend soortelijk gewicht hebben, verschuift deze grens iets. Inderdaad komen er in het planetenstelsel nergens satellieten voor binnen de grens van Roche. Wel moet bedacht worden, dat de klassieke afleiding geen rekening houdt met de cohesie, waardoor vaste stoffen bijeengehouden worden; in het geval van de aarde begint de grens van Roche maar een rol te spelen voor vaste satellieten groter dan 200 km. Zij zou van betekenis zijn bij een satelliet van de grootte van de maan, die zich niet ongedeerd van de aarde zou kunnen afscheiden; dit geval is echter veel ingewikkelder dan het klassieke model en de stelling mag hier niet zonder meer toegepast worden.

De ringen van Saturnus bestaan uit zó kleine blokjes dat de getijkrachten niet de oorzaak kunnen zijn van deze verbrokkeling.

I.7.3 *Voorkomen van leven op de planeten*

Bij het vragen naar voorkomen van leven dienen wij duidelijk te onderscheiden: *a* levende wezens zoals wij ze op aarde kennen; *b* geheel anders gebouwde organismen. Dat inderdaad zeer afwijkende vormen van leven denkbaar zijn, leren we door het onderzoek van de fossielen uit de oertijd van de aarde. Uit wat we weten over de planeten kunnen we al direct besluiten, dat ze onbewoonbaar zijn voor bijna alle wezens die wij op aarde kennen. Alleen al de afwezigheid van een normale hoeveelheid water en het voorkomen van zeer hoge of zeer lage temperaturen zijn in dat opzicht afdoende. Ook wanneer we de vraag ruimer stellen, moet het voorkomen van leven slechts op weinig planeten mogelijk worden geacht.

Immers, het leven is essentieel gebonden aan de beweeglijke evenwichten van de eiwitstoffen; maar eiwittsoffen zijn ondenkbaar zonder water of boven 100° C, terwijl beneden 0° deze stoffen wel niet vernietigd worden, maar toch zo inactief blijven, dat geen levensprocessen kunnen plaatsvinden. Alleen de aarde en Mars vallen vermoedelijk binnen aannemelijke temperatuurgrenzen. Bij Mars hebben we gezien, dat er inderdaad enkele aanwijzingen voor leven zijn. Dit leven kan op een zeer lage trap van biologische ontwikkeling staan, het kan een plantengroei zijn van wieren of mossen of woestijnplanten. Door proeven heeft men aangetoond dat sommige micro-organismen kunnen blijven leven in omstandigheden die het 'Marsklimaat' benaderen. Het is denkbaar, dat de evolutie zich op Mars sneller voltrokken heeft dan op de aarde en dat er ook hoger georganiseerde wezens voorkomen, die zich geleidelijk hebben aangepast aan de droogte en aan de ijler wordende atmosfeer.

In het geval van Venus en Jupiter is het niet geheel uitgesloten, dat zwevende levende wezens zouden vóórkomen in zeer bepaalde lagen van de dampkring, waar de temperatuur gunstige waarden bereikt.

Het voorkomen van organische stoffen in de koolstofhoudende meteorieten is uitermate merkwaardig. Ook al mochten de daarin voorkomende structuren niet als fossielen worden beschouwd, dan nog zou men moeten besluiten dat organische stoffen, zelfs de ingewikkelde bouwstenen van de eiwitten, in de natuur tot stand kunnen komen zonder tussenkomst van het leven, bijvoorbeeld door het ultraviolet van de zon, bliksemontladingen enzovoort. Proeven in het laboratorium hebben dit bevestigd: in mengsels van H_2O, CH_4, H_2CO_3, HCN, NH_3 vormen zich door bestraling: adenine, aminozuren, ribose en andere bouwstenen van de cel. Ook als men uitgaat van H_2O, CO_2, CO, N_2, H_2 (een waarschijnlijker samenstelling van de oer-atmosfeer) krijgt men dergelijke stoffen. Zo lijkt het mogelijk, dat zich op aarde dergelijke stoffen hebben gevormd, waaruit dan geleidelijk de eenvoudigste organismen zijn ontstaan.

Leven zou ook kunnen voorkomen op planeten om andere sterren, als die er werkelijk zijn. Het onderscheiden van zulke zwak verlichte stipjes vlak bij helder stralende hemellichamen is onmogelijk. Wanneer we echter de baan van een ster nauwkeurig volgen, vinden we daarin soms golvingen en we besluiten dat de ster een lichtzwakke, onzichtbare begeleider heeft. Van sommige aldus ontdekte begeleiders is de massa zo klein, dat we meer aan een planeet dan aan een ster moeten denken; planeten van tien maal de massa van Jupiter kunnen op deze wijze al worden opgespoord. Onlangs is zelfs een begeleider ontdekt, waarvan de massa slechts anderhalf maal die van Jupiter bedraagt, en die ongetwijfeld een planeet is (Van de Kamp).

Het aantal voldoende onderzochte sterren is nog maar zeer gering, de waar te nemen golving van de baan is aan de grens van de meetnauwkeurigheid. Hoewel dus in beginsel het voorkomen van grote planeten om andere sterren vastgesteld kan worden, zijn wij voorlopig nog verplicht, af te gaan op theoretische redenering. Daarbij hangt alles af van de wijze waarop wij ons het ontstaan van de planetenstelsels voorstellen. Is planetenvorming een normaal voorkomend verschijnsel – zoals de monistische theorieën volhouden – dan moeten er talloze dergelijke stelsels in het heelal voorkomen, en dan zou het wel vreemd zijn, als die alle onbewoond waren.

I.7.4 *Verbinding tussen de planeten*

Reeds lang geleden zijn allerlei fantastische methoden voorgesteld om seinen naar andere planeten over te brengen of om zich naar deze planeten te begeven. Met de uitbreiding van de moderne techniek mogen dergelijke plannen niet langer als onmogelijk worden beschouwd. Verscheidene raketten zijn nu op de maan geland, een andere op de planeet Venus.

Weldra zullen meer onderzoekingen volgen, en er valt niet aan te twijfelen dat straks een bemand ruimteschip onze satelliet zal bereiken. Met radiogolven is in beginsel verbinding mogelijk met planeten om andere sterren dan de zon die we wel nooit zullen kunnen betreden; pogingen in die richting hebben tot dusverre nog geen succes gehad.

LITERATUUR:

Van de vele boeken over hemelmechanica noemen wij alleen:

F. R. MOULTON, *An Introduction to Celestial Mechanics*, Macmillan, 1914.

R. KURTH, *Introduction to the Mechanics of the Solar System*, Pergamon, 1959.

V. M. BLANCO AND MCCUSKEY, *Basic Physics of the Solar System*, Reading, 1961.

K. STUMPFF, *Himmelsmechanik*, Berlin, 1959, 1965 (standaardwerk).

Getijkrachten:

G. H. DARWIN, *The Tides and Kindred Phenomena in the Solar System*, London, 1901.

A. DEFANT, *Ebbe und Flut des Meeres, der Atmosphäre und der Erdfeste*, Berlin, 1953.

Over het planetenstelsel in het algemeen:

A. J. M. WANDERS, *De planeten en hun raadsels*, Utrecht, 1936.

V. V. SHARONOV, *The Nature of the Planets*, N.A.S.A., Washington, 1964 (uit het Russisch).

J. C. BRANDT en P. W. HODGE, *Solar System Astrophysics*, New York, 1964.

G. P. KUIPER (redacteur), *The Solar System*; Vol. II, *The Earth*, 1954; Vol. III, *Planets and Satellites*, 1961; Vol. IV, *The Moon, Meteorites and Comets*, 1963; Chicago (standaardwerk).

MOROZ, *Physics of Planets*, N.A.S.A., Washington, 1968; modern standaardwerk (uit het Russisch).

V. DE CALLATAIJ, A. DOLLFUS, *Atlas des planètes*, Paris, 1968.

De aarde:

J. VELDKAMP, *Geofysica*, Utrecht, 1965.

J. BARTELS, *Geophysik*, Frankfurt, 1960.

J. BARTELS, *Handbuch der Physik*, Bd. XLVII-XLIX, Springer, 1956-1967; standaardwerk.

W. H. MUNK en G. J. MACDONALD, *The Rotation of the Earth*, Cambridge, 1960.

De maan:

A. J. M. WANDERS, *Op ontdekking in het Maanland*, Utrecht, 1950.

J. VAN DIGGELEN, *Buurland Maan*, Amsterdam, 1962.

TJ. DE VRIES, *De wereld van de maan*, Groningen, 1968.

ZD. KOPAL, *Exploration of the Moon by Spacecraft*, London, 1968.

ZD. KOPAL, *Physics and Astronomy of the Moon*, Academic Press, 1962.

ZD. KOPAL, *An Introduction to the Study of the Moon*, Dordrecht, 1966.

D. ALTER, *Lunar Atlas*, Dover Public., 1964.

G. P. KUIPER, *Photographic Lunar Atlas*, Chicago, 1960 (standaardwerk).

E. A. WHITAKER e.a., *Rectified Lunar Atlas*, Tucson, 1963 (standaardwerk).

G. P. KUIPER, *Consolidated Lunar Atlas*, Tucson, 1967 (standaardwerk).

Mercurius:

W. SANDNER, *The Planet Mercury*, London, 1963.

Venus:

P. MOORE, *The Planet Venus*, New York, 1959.

Handbook of the Physical Properties of the Planet Venus, NASA Administration, Washington, 1967.

Mars:
A. J. M. WANDERS, *Het Raadsel Mars*, Utrecht, 1956.
P. MOORE, *Guide to Mars*, London, 1960.
C. M. MICHAUX, *Handbook of the Physical Properties of the Planet Mars*, NASA, Washington, 1967.
E. C. SLIPHER, *The Photographic Story of Mars*, Cambridge Mass., 1962.

Planetoïden:
G. D. ROTH, *The System of Minor Planets*, London, 1962.

Jupiter:
B. M. PEEK, *The Planet Jupiter*, London, 1958.
Handbook of the Physical Properties of Jupiter, NASA, Washington, 1967.

Saturnus:
A. F. O'D. ALEXANDER, *The Planet Saturn*, London, 1962.

Uranus:
A. F. O'D. ALEXANDER, *The Planet Uranus*, London, 1965.

Kometen:
J. DUFAY, *Les Comètes*, Paris, 1966.
K. WURM, *Die Kometen*, Berlin, 1954.
N. B. RICHTER, *Statistik und Physik der Kometen*, Leipzig, 1954; vertaald: *The Nature of Comets*, London, 1963.
P. SWINGS en L. HASER, *Atlas of Representative Cometary Spectra*, Luik, 1956.

Meteoren en meteorieten:
FR. HEIDE, *Kleine Meteoritenkunde*, 1957.
B. MASON, *Meteorites*, New York, 1962.
E. L. KRINOW, *Giant Meteorites*, Oxford, 1966 (uit het Russisch).
E. L. KRINOW, *Principles of Meteoritics*, Pergamon Press, 1960 (uit het Russisch).
A. C. B. LOVELL, *Meteor Astronomy*, Oxford, 1954.
B. J. LEWIN, *Physikalische Theorie der Meteore*, Berlin, 1961 (uit het Russisch).

Zonnewind:
R. J. MACKIN JR. en M. NEUGEBAUER, *The Solar Wind*, Oxford, 1966.

Ontstaan, vergaan, toekomst:

C. DE JAGER, *Ontstaan en Levensloop van Sterren en Planeten*, Zutphen, 1955.

H. P. BERLAGE, *The Origin of the Solar System*, Oxford, 1968.

E. SCHATZMAN, *Origine et évolution des Mondes*, Paris, 1957.

A. G. W. CAMERON en R. JASTROW, *The Origin of the Solar System*, London, 1963.

B. G. MARSDEN en A. G. W. CAMERON, *The Earth-Moon System*, New York, 1966.

A. J. DEUTSCH en W. B. KLEMPERER, *Space Age Astronomy*, London, 1962.

F. JACKSON en P. MOORE, *Leven in het Heelal*, Utrecht, 1965.

A. I. OPARIN, *The Origin of Life*, Dover Public., 1953 (uit het Russisch).

I. S. SHKLOVSKII en C. SAGAN, *Intelligent Life in the Universe*, Holden-Day, 1966 (standaardwerk).

II De zon

DR. C. ZWAAN en DR. M. KUPERUS, *Sterrenkundig Instituut te Utrecht*

II.1 INLEIDING; DE AFMETINGEN EN HET UITERLIJK VAN DE ZON

Alle leven op aarde zou onmogelijk zijn zonder de zon. Zelfs dieren, die nooit het daglicht zien omdat zij onder de aarde of in de diepzee leven, zouden sterven als de zon ophield te schijnen. Zonder warmte van de zon zou de wind niet waaien, de zee niet golven, zouden de rivieren niet stromen.

Van alle energie die de zon uitzendt, treft slechts een zeer klein gedeelte de aarde. Dit is het gevolg van de grote afstand tot de zon en de naar verhouding kleine afmetingen van de aarde. De zon is 150 miljoen km van ons verwijderd; deze afstand is meer dan 10 000 maal zo groot als de middellijn van de aarde. De middellijn van de zonnebol is ongeveer

---

Plaat 20 Meteoor, opgenomen met de super-Schmidt-camera. Een draaiende sector onderschept het licht twintig maal per seconde, zodat men de snelheid van de meteoor kan bepalen. Opname Whipple, Smithsonian Institution, Astrophysical Observatory, Cambridge (Massachusetts, Verenigde Staten).

Plaat 22 De figuren van Widmanstätten in het geëtste oppervlak van een ijzermeteoriet.

Plaat 23 De zon in wit licht. De randverzwakking is duidelijk zichtbaar. Behalve zonnevlekken vertoont de schijf ook fakkels; dit zijn gebieden die iets helderder zijn en die op deze foto zichtbaar zijn nabij de rand, vooral om zonnevlekken (foto opgenomen op Mt. Wilson Observatory).

1,4 miljoen km, dat is ruim 100 maal zo groot als die van de aarde. De inhoud van de zon is dus meer dan een miljoen maal groter dan die van onze planeet. Aangezien de massa van de zon slechts 330 000 maal zo groot is, is de gemiddelde dichtheid slechts 1,4 gram per cm^3, terwijl de dichtheid van de aarde 5,5 gram per cm^3 bedraagt. (Vergelijk dit met de dichtheid van water, die gelijk is aan 1 gram per cm^3.)

De hoeveelheid zonnestraling, die op aarde 1 cm^2 in 1 minuut treft, de zogenoemde zonneconstante, bedraagt 2,0 calorieën (bij loodrechte bestraling). De straling, die de aarde bereikt, is sterk 'verdund' door de grote afstand. Aan het oppervlak van de zon is de energiestroom meer dan 40 000 maal zo sterk: 90 000 calorieën per cm^2 en per minuut. Dit wijst op een temperatuur van 5800° Kelvin. Bij zo'n hoge temperatuur moet de zon gasvormig zijn.

In wit licht waargenomen, doet de zon zich voor als een schijf (plaat 23). Het zichtbare 'oppervlak' blijkt in werkelijkheid een gaslaag van een paar honderd km dikte te zijn, die fotosfeer wordt genoemd. Opvallend is de randverzwakking: naar de rand toe neemt de helderheid van de schijf af, vooral aan de uiterste rand. Foto's van goede kwaliteit laten zien, dat de fotosfeer bezaaid is met heldere korreltjes, de granulae (plaat 24). Meestal vertoont de fotosfeer ook zonnevlekken (plaat 24).

Uit regelmatige waarnemingen van zonnevlekken is gebleken, dat de zon roteert. De zon wentelt niet als een star lichaam: de rotatieperiode is aan de zonne-equator 24,7 dagen, op 35° breedte 26,7 dagen en op 75° breedte meer dan 33 dagen. Deze ongelijkmatigheid noemt men de differentiële rotatie.

De zonnevlekken komen alleen in gordels aan weerszijden van de zonne-

---

Plaat 24 Granulatie en zonnevlekken. De grootste zonnevlek vertoont de umbra en daaromheen de penumbra met de straalsgewijze structuur van striae. Op de foto is bovendien een aantal poriën zichtbaar, waaronder een zeer grote in de linkerbovenhoek. De fotosfeer (om de zonnevlekken heen) is bezaaid met heldere stipjes, de granulae. Deze foto is gemaakt met de stratoscoop, een door een stratosfeerballon gedragen instrument (Princeton University).

Plaat 25 De chromosfeer aan de zonsrand. De omhoog gerichte spicules zijn duidelijk zichtbaar. De fotosfeer is in het instrument afgeschermd door een donkere schijf (opname R. B. Dunn; Sacramento Peak Observatory).

Plaat 26 De corona tijdens de totale zonsverduistering van 25 februari 1952. De uitlopers en poolbundels zijn duidelijk zichtbaar (opname G. W. van Biesbroeck).

equator voor, deze vlekkengordels strekken zich uit van 5° tot 40° breedte.

Bij zonsverduisteringen blijkt, dat de zonne-atmosfeer niet bij de fotosfeer eindigt. Zodra de maan de fel lichtende fotosfeer geheel heeft afgeschermd, wordt een smal purperrood sikkeltje zichtbaar. Dit sikkeltje is een deel van de chromosfeer, een gasschil van niet meer dan 10 000 km dikte, die de fotosfeer omhult. De bovenkant van de chromosfeer is rafelachtig: de 'sprietjes' worden spicules genoemd (plaat 25). Hoog boven de chromosfeer ziet men dikwijls de eveneens purperrode protuberansen zweven. Buiten de chromosfeer spreidt zich de corona uit, een zilvergrijze stralenkrans waarvan de vorm in de loop van de jaren verandert (plaat 26). De met het blote oog zichtbare uitlopers zijn vaak meer dan een miljoen km lang.

Buiten zonsverduisteringen zijn chromosfeer en corona niet direct waarneembaar, omdat het hemellicht van de aardse dampkring en het strooilicht in de instrumenten dan veel te fel is. Met speciaal daartoe ontworpen instrumenten (spectroheliografen en coronografen; zie deel 1, II.8) kan men deze moeilijkheid gedeeltelijk overwinnen.

Dit hoofdstuk gaat verder in op de buitenste, waarneembare delen van de zon. Het inwendige en de evolutie van de zon worden in deel 3, I.2 besproken.

II.2 HET ZONNESPECTRUM

II.2.1 *Beschrijving van het spectrum*

Met behulp van een spectrograaf kan men van het licht van de zon een spectrum maken (zie deel 1, II.8.2). Het spectrum van het zichtbare zonnelicht blijkt een kleurenband te zijn, waarin de kleuren van de regenboog van rood tot violet voorkomen. Dit continue spectrum wordt onderbroken door duizenden smalle, donkere spectrale lijnen van zeer uiteenlopende donkerheid en breedte (plaat 27). Deze lijnen worden fraunhoferlijnen genoemd, naar Fraunhofer die ze in 1814 ontdekte.

Het spectrum blijkt zich verder uit te strekken dan de voor ons oog zichtbare kleuren, die liggen tussen de golflengten 4000 Å (violet) en 7600 Å (rood); 1 Å = 10^{-8} cm. Dit kan worden aangetoond met fotografisch materiaal en met instrumenten die gevoelig zijn voor de onzichtbare soorten straling (zie deel 1, II.4, III.6.2 en IV.2.3).

Voor het onzichtbare gebied aan de violette zijde van het spectrum worden de volgende benamingen gebruikt: van 4000 tot ongeveer 100 Å: ultraviolet; van ongeveer 100 tot 1 Å: röntgenstraling. De straling met

nog kortere golflengten wordt harde röntgenstraling genoemd. Aangezien alle straling beneden 3000 Å volledig door de aardse dampkring wordt geabsorbeerd, kan het spectrum in dit gebied alleen met behulp van raketten en kunstmanen worden waargenomen (deel 1, IV.1).

In het ultraviolette spectrum komen nog donkere absorptielijnen voor tot ongeveer 1500 Å. Bij nog kortere golflengten treft men daarentegen uitsluitend heldere emissielijnen aan.

Op de rode zijde van het zichtbare spectrum sluit het onzichtbare infrarode spectrum aan (7600 Å – 1 mm), waarop het gebied van de *radiostraling* (golflengten groter dan 1 mm) volgt. Een groot deel van de infrarode straling wordt door de aardse dampkring geabsorbeerd. De apparatuur om de radiostraling waar te nemen wijkt sterk af van de apparatuur die men voor het onderzoek van het zichtbare spectrum gebruikt (zie deel 1, III.1.3).

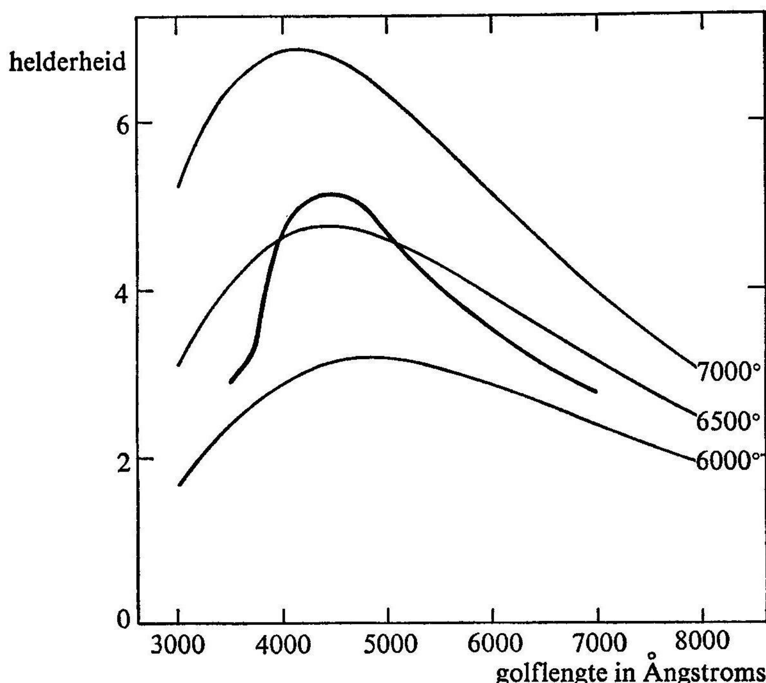
Tot hier toe hebben wij het spectrum van het midden van de zonneschijf besproken. Tijdens een zonsverduistering kan men het spectrum van de chromosfeer afzonderlijk waarnemen (de instrumenten zijn behandeld in deel 1, II.8). Dit spectrum ziet er in het *zichtbare* gebied anders uit dan het spectrum van de fotosfeer: het continue spectrum is uiterst zwak; juist op de plaatsen waar het fotosfeerspectrum absorptielijnen vertoont, laat het chromosfeerspectrum heldere emissielijnen zien (plaat 28). De sterkte van de chromosferische emissielijnen komt in ruwe trekken overeen met de sterkte van de fotosferische absorptielijnen; er zijn echter ook duidelijke verschillen.

Het spectrum van de corona bestaat in het zichtbare gebied uit twee componenten: *1* een heel zwak continu spectrum, met sterk verwazigde fraunhoferlijnen; *2* heldere emissielijnen die op geheel andere plaatsen optreden dan de fotosferische en chromosferische lijnen.

II.2.2 *Het continue spectrum*

Het spectrum geeft veel inlichtingen over de fysische omstandigheden in de verschillende delen van de zon. Het gaat er nu om, het 'spectrale geheimschrift' te ontcijferen. Wij bespreken eerst het continue spectrum, waarbij de fraunhoferlijnen buiten beschouwing blijven.

De helderheid van het continue spectrum van de fotosfeer blijkt sterk van de golflengte (de 'kleur') af te hangen; de helderheid is het grootst in het blauwe en violette deel van het spectrum (afb. 30). Uit de natuurkunde is bekend, dat de helderheid van het spectrum van zeer dikke lagen heet gas alleen afhangt van de golflengte en de temperatuur van het gas. Bij toenemende temperatuur neemt de helderheid van het gehele spectrum toe en wel voornamelijk aan de (ultra-) violette kant van het spectrum.



Afb. 30 De helderheidsverdeling in het spectrum van de fotosfeer. De dikke lijn stelt de spectrale helderheidsverdeling van het midden van de zonneschijf voor. De dunne lijnen geven de helderheidsverdelingen aan volgens de wet van Planck voor een drietal temperaturen.

Planck (1858-1947) heeft de formule afgeleid, die precies aangeeft hoe de helderheid in het spectrum, $B_\lambda(T)$, afhangt van de temperatuur T en de golflengte λ:

$$B_\lambda(T) = \frac{c_1}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \qquad (1),$$

waarbij c_1 en c_2 constanten zijn, die niet van λ en T afhangen. Voor enkele temperaturen is de spectrale helderheidsverdeling volgens de wet van Planck weergegeven in afb. 30.

De temperatuur, die met de wet van Planck kan worden afgeleid uit de helderheid van het zonnespectrum bij een bepaalde golflengte, noemt men

de monochromatische ('éénkleurige') stralingstemperatuur van de zon bij die golflengte. Dit is dan tevens de temperatuur van de laag waaruit de straling van die golflengte afkomstig is.

Bij verschillende golflengten vindt men verschillende monochromatische stralingstemperaturen, zoals uit afb. 30 blijkt. Doordat de doorzichtigheid van het zonnegas afhangt van de golflengte, komen de stralingen bij de verschillende golflengten uit verschillende lagen, die blijkbaar verschillende temperaturen hebben. De doorzichtigheid van de zonnematerie voor de verschillende golflengten is bekend; daardoor is het mogelijk uit de monochromatische stralingstemperatuur het verloop van de temperatuur met de diepte in de zon af te leiden.

In het zichtbare deel van het spectrum is de doorzichtigheid van het zonnegas vrij groot; het licht uit de diepere lagen van de fotosfeer kan ons nog bereiken. Uit de helderheid van het zichtbare spectrum volgt dan, dat deze lagen een temperatuur van ongeveer 6500° moeten hebben. In het ultraviolette gebied van het spectrum neemt de doorzichtigheid van de zonnematerie af naarmate de golflengte kleiner wordt, dus de straling komt uit steeds hogere lagen. Uit de spectrale helderheden blijkt dan, dat de temperatuur in de fotosfeer naar buiten toe afneemt. Bij ongeveer 1800 Å komt de straling uit de 'koudste' lagen van de zon (4600°); dit is juist het overgangsgebied van de fotosfeer naar de chromosfeer. Bij nog kortere golflengten komt de straling uit de chromosfeer en uit de corona. Het helderheidsverloop in het (verre) ultraviolet laat zien, dat in de chromosfeer en corona de temperatuur naar buiten weer toeneemt. Deze conclusies zijn, samen met resultaten van onderzoek die in volgende paragrafen aan de orde komen, weergegeven in de tabel op blz. 102.

Ook voor de radiostraling is de zonnematerie ondoorzichtig. De straling met golflengten kleiner dan 10 cm komt uit de chromosfeer, terwijl de straling met grotere golflengten uit de corona afkomstig is. Dit blijkt bovendien uit het feit dat men ook nog radiostraling buiten de rand van de fotosfeer meet (afb. 31).

De intensiteit van de radiostraling en de sterkte van de röntgenstraling (die eveneens uit de corona afkomstig is) blijken sterk veranderlijk te zijn. Dit wijst erop dat de structuur van de corona aan veranderingen onderhevig is (zie deel 2, II.4.1 en II.6.2-4).

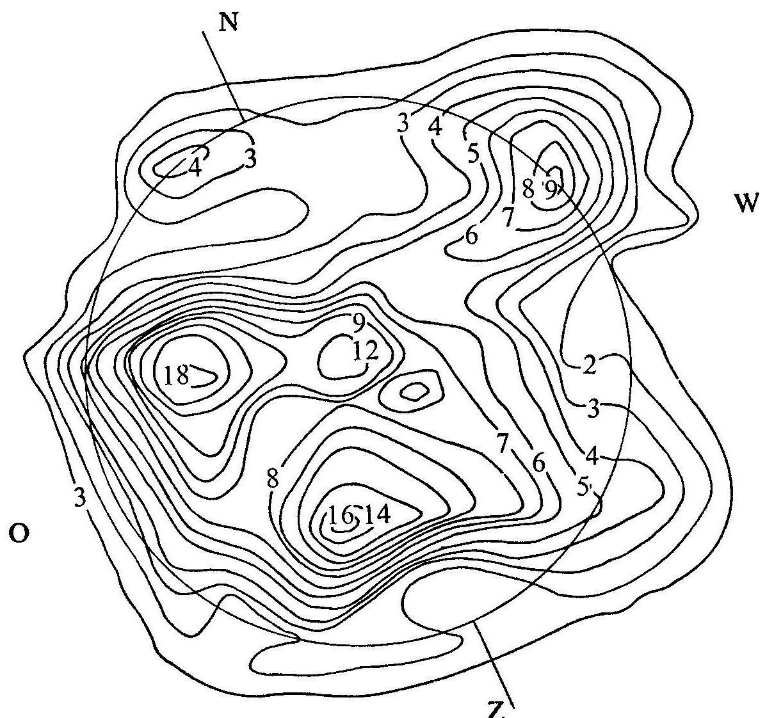
II.2.3 *De spectrale lijnen*

Het optreden van de spectrale lijnen kan worden verklaard met behulp van de atoomtheorie. In een atoom kunnen de buitenste elektronen in een groot aantal verschillende banen om de atoomkern lopen. Wanneer

gebied	*hoogte (—) diepte (+) (km)*	*temperatuur (°K)*	*druk (atm)*	*dichtheid (g/cm³)*	*temperatuur afgeleid uit:*
corona	— 20 000	≈ 1 600 000	5×10^{-8}	10^{-16}	emissielijnen,
	— 6 000	≈ 20 000	3×10^{-6}	10^{-12} — 10^{-14}	radiostraling, dichtheidsverdeling
chromosfeer	— 550	5 000	0,001	$0{,}35 \times 10^{-9}$	eclipsspectra, helderheid in UV spectrum
fotosfeer	0	4 600	0,018	$0{,}06 \times 10^{-6}$	helderheid uiterste rand zonneschijf, helderheid UV
	+ 150	5 225	0,062	$0{,}19 \times 10^{-6}$	helderheid zonneschijf
	+ 250	6 630	0,15	$0{,}34 \times 10^{-6}$	
convectie-zone	+ 350	8 950	0,24	$0{,}41 \times 10^{-6}$	theorie
	+ 70 000	710 000	500 000	5500×10^{-6}	

het atoom licht van een zeer bepaalde golflengte absorbeert, springt een elektron van een bepaalde 'nauwe' baan in een 'wijdere' baan over. Men noemt dit aanslag of excitatie van het atoom. Wanneer het elektron uit de wijde baan terugvalt in de oorspronkelijke nauwe baan, zendt het atoom licht uit van precies dezelfde golflengte die het tevoren geabsorbeerd had. Het omhoog springen of het terugvallen van een elektron kan ook zonder uitwisseling van straling gebeuren, wanneer het atoom met een naburig deeltje botst. De atomen van één element kunnen slechts licht van een beperkt aantal zeer bepaalde golflengten absorberen of emitteren. Anders gezegd: elk element heeft zijn karakteristieke spectrale lijnen.

Een atoom kan door botsingen met andere deeltjes of door absorptie van licht eenmaal of meermalen geïoniseerd worden, waarbij het één of meer elektronen verliest. De atoomkern met de overblijvende 'gebonden' elektronen wordt een ion genoemd. De mate van ionisatie hangt sterk af van de temperatuur. Bij temperaturen in de buurt van 4000° bestaat een gas in zon en sterren vrijwel uitsluitend uit gewone atomen. Neemt de temperatuur toe, dan neemt het aantal gewone atomen af en



Afb. 31 Radio-isofoten voor de golflengte 21 cm. De dun getrokken cirkel stelt de normale zonneschijf voor. De bochtige lijnen verbinden punten die eenzelfde hoeveelheid radiostraling uitzenden. De sterkste straling komt uit de condensaties in de corona. De bijgeschreven cijfers geven, na vermenigvuldiging met 56 000°, de zogenoemde helderheidstemperatuur (op 2 augustus 1957 opgenomen op het radio-observatorium te Sydney).

het aantal enkelvoudig geïoniseerde atomen (die dus één elektron missen) toe. Bij verder toenemende temperatuur zijn er vrijwel geen atomen meer over en komen er meer dubbel geïoniseerde atomen. Dit gaat zo door totdat de atomen bij zeer hoge temperaturen alle elektronen verloren hebben. Hoge drukken werken de ionisatie tegen. De wet van Saha beschrijft hoe de ionisatie van de temperatuur en van de druk afhangt:

Als N_i het aantal deeltjes van een bepaald element is dat i maal geïoniseerd is, dus i elektronen verloren heeft, en N_{i-1} het aantal deeltjes van datzelfde element dat (i–1) maal geïoniseerd is, wordt de verhouding van deze aantallen gegeven door:

$$\frac{N_i}{N_{i-1}} = \text{constante} \times \frac{T^{\frac{5}{2}}}{P_e} \times e^{-\chi/kT} \qquad (2),$$

waarin T de temperatuur, P_e de elektronendruk, k de zogenoemde constante van Boltzmann en χ de energie die nodig is om een (i–1) maal geïoniseerd atoom i maal te ioniseren.

Ook bij ionen kunnen de buitenste elektronen, die nog gebonden zijn aan de kern, van een 'nauwe' baan overspringen op een 'wijde' baan (of omgekeerd) en daarbij straling absorberen (of uitzenden). Van elk element heeft *elk* ion, dat een bepaald aantal elektronen mist, weer een reeks eigen spectrale lijnen.

Door het zonnespectrum met spectra uit laboratoria te vergelijken, kan men de fraunhoferlijnen identificeren en daaruit tot de aanwezigheid van bepaalde elementen in het zonnegas besluiten (zie ook deel 2, II.7 en plaat 27). In het spectrum van de fotosfeer en van de lage chromosfeer vindt men uitsluitend lijnen van niet-geïoniseerde en éénmaal geïoniseerde atomen. Dit is volgens de wet van Saha in goede overeenstemming met de reeds genoemde temperaturen van 4600° tot 7000°. In het spectrum van de corona treden uitsluitend lijnen op van zeer sterk geïoniseerde atomen; men heeft zelfs lijnen gevonden van vijftien maal geïoniseerd ijzer. Dit wijst erop, dat in de corona een temperatuur van ruim een miljoen graden heerst (zie deel 2, II.4)!

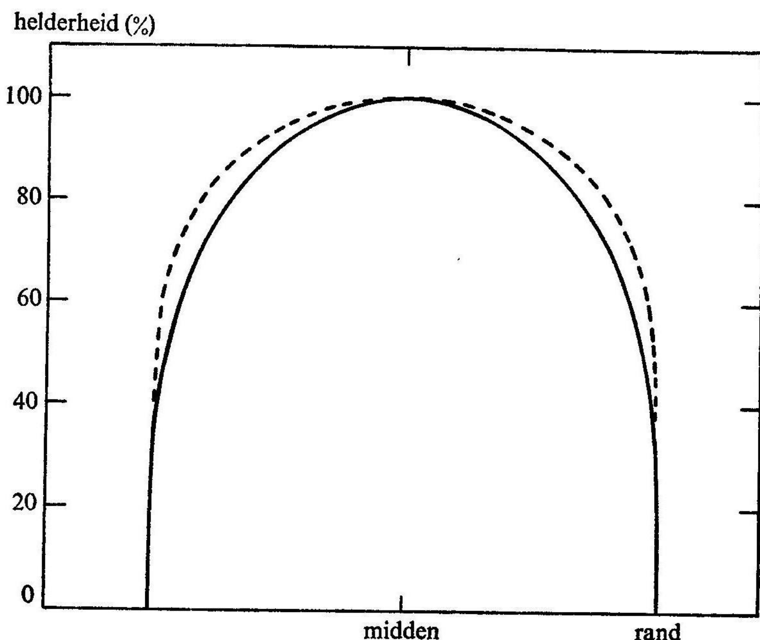
In het spectrum van de fotosfeer komen weinig moleculaire lijnen voor, men ziet alleen maar zwakke lijntjes van enkele uit twee atomen opgebouwde moleculen. Dit is begrijpelijk, want bij temperaturen hoger dan 4600° worden vrijwel alle moleculen gedissocieerd tot afzonderlijke atomen. In het spectrum van zonnevlekken worden veel sterkere lijnen gevonden van meer verschillende moleculen; wij komen daar in deel 2, II.3.2 op terug.

Met de wet van Planck kan eveneens worden verklaard, waarom de fraunhoferlijnen in het zichtbare deel van het spectrum donker zijn. In de golflengte van een spectrale lijn kunnen de atomen of ionen van het bijpassende element het licht gemakkelijk absorberen. Voor die golflengte is de zonnematerie dus veel minder doorzichtig. De straling 'in' de spectrale lijn komt dus uit hogere delen van de fotosfeer of zelfs uit de lage chromosfeer, die een lagere temperatuur hebben dan de diepere fotosfeer, waar het licht van het continue spectrum vandaan komt. (Volledigheidshalve zij vermeld, dat alleen een meer verfijnde theorie kan verklaren, dat sommige van de sterkste lijnen bijna zwarte kernen hebben.) Op soortgelijke wijze is het te begrijpen dat de spectrale lijnen in het ultraviolet

voor golflengten kleiner dan 1500 Å emissielijnen zijn. Het licht in het continue spectrum komt hier uit de lage chromosfeer, terwijl het licht in de spectrale lijnen uit hogere en dus hetere lagen van de chromosfeer of de corona komt.

Van de omstandigheid dat het licht in de fraunhoferlijnen afkomstig is uit hogere lagen dan het licht in het continue spectrum, kan men gebruik maken door de zon in het licht van een sterke spectrale lijn waar te nemen, bijvoorbeeld van waterstof of van geïoniseerd calcium. Men past dit toe bij een spectroheliograaf of een monochromatisch filter (zie deel 1, II.8.1). In dit 'spectrale lijn-licht' ziet men op de zonneschijf details in de chromosfeer, die voor 'gewoon' licht volkomen doorzichtig zijn (plaat 29 en plaat 30).

De eclipsspectra van de chromosfeer en van de corona in het zichtbare gebied kunnen nu ook worden verklaard. De continue spectra zijn uiterst zwak, omdat het gas van deze lagen vrijwel volkomen doorzichtig is. Alleen *in* de spectrale lijnen is de materie niet geheel doorzichtig, zodat vrij zwakke emissielijnen zichtbaar worden.



Afb. 32 Het helderheidsverloop over de zonneschijf. De getrokken lijn geldt voor blauw licht (4575 Å), de gebroken lijn voor rood licht (6600 Å).

Een belangrijk verschijnsel is nog het zogenoemde doppler-effect. Beweegt de lichtbron naar de waarnemer toe, dan verschuiven alle spectrale lijnen iets naar het violet, terwijl bij verwijdering een verschuiving naar het rood optreedt. Uit de mate van verschuiving kan direct de snelheid worden gevonden.

De absorberende en emitterende atomen hebben vrij grote individuele snelheden ten gevolge van de warmtebeweging. Deze snelheden hebben componenten in de gezichtslijn. Als de atmosfeer in rust is ten opzichte van de waarnemer, bewegen zich evenveel atomen naar de waarnemer toe als van de waarnemer af. Dit leidt dus tot een verbreding van de kernen van de spectrale lijnen. Daarom kan men uit de breedte van een lijnkern ook een temperatuur afleiden. Vaak blijkt deze bepaling hogere temperaturen op te leveren dan de andere temperatuurbepalingen die hierboven beschreven zijn. Men schrijft deze te hoge waarde toe aan turbulentie, dit is een wanordelijk snelheidsveld van gaselementen in de atmosfeer. Uit de breedte van de spectrale lijn en uit de langs andere weg bepaalde temperatuur volgt dan de middelbare snelheid van de elementen, de zogenoemde turbulente snelheid. Voor de fotosfeer vindt men een waarde van ruim een km per seconde; uit eclipsspectra van de chromosfeer komen wat hogere waarden te voorschijn.

II.3 VERSCHIJNSELEN IN FOTOSFEER EN LAGE CHROMOSFEER

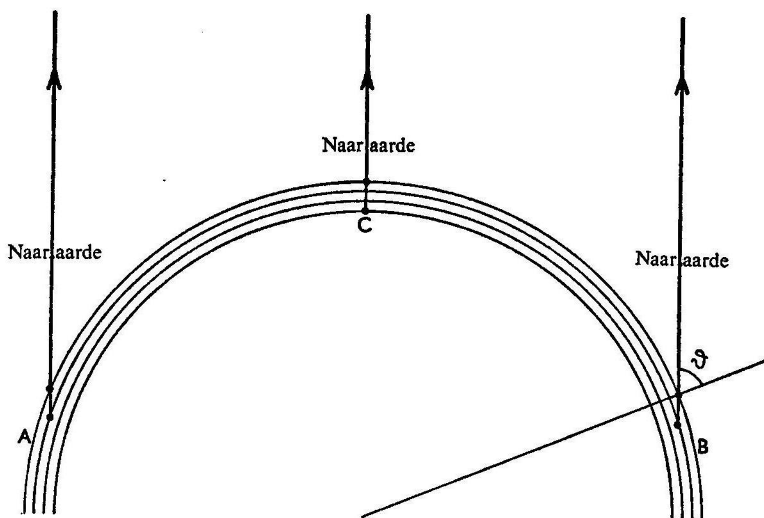
II.3.1 *Fotosfeer en convectiezone*

De randverzwakking van de fotosfeer (deel 2, II.1 en plaat 23 en afb. 32) leert ons, dat de hogere delen van de fotosfeer een lagere temperatuur hebben dan de diepere delen. Nabij de rand van de zon dringt onze blik onder een scheve hoek in de fotosfeer; wij kunnen daarom minder diep kijken dan nabij het centrum van de schijf het geval is (afb. 33); de straling uit de minder diepe, dus koelere, lagen heeft een geringere intensiteit.

Uit nauwkeurige metingen van de randverzwakking bij één golflengte kan men met de wet van Planck (zie deel 2, II.2.2) het verloop van de temperatuur met de diepte in de fotosfeer afleiden.

Wij gaan iets dieper in op de methode. Daarbij speelt het begrip optische diepte een rol. Als men de absorptiecoëfficiënt bij de gekozen golflengte, $\varkappa_\lambda$, op iedere diepte in de atmosfeer kent, is het verband tussen de optische diepte τ_λ en de geometrische diepte z gegeven door

$$\tau_\lambda (z) = \int_{-\infty}^{z} \varkappa_\lambda \, d\, z \qquad (3),$$



Afb. 33 Verklaring van de randverzwakking.

Kijkt men op een punt van de zonneschijf waar de naar de waarnemer uittredende straling een hoek ϑ maakt met de loodlijn op het zonneoppervlak (zie afb. 33), dan komt deze straling uit een laag met een gemiddelde optische diepte $\tau_\lambda \approx \cos\vartheta$. Bij het centrum van de schijf komt de straling dus uit een laag met $\tau_\lambda \approx \cos 0° = 1$; bij $\vartheta = 78°$, dat is dicht bij de zonsrand, is de straling afkomstig uit een laag met $\tau_\lambda \approx 0{,}2$.

Men kan de methode herhalen door de randverzwakking bij vele golflengten λ te meten. Wij hebben trouwens al gezien dat men het temperatuurverloop met de diepte ook al kan afleiden uit het helderheidsverloop van het spectrum van slechts één punt van de zonneschijf, bijvoorbeeld het centrum (deel 2, II.2.2). Hoewel het temperatuurverloop in beginsel op vele manieren kan worden bepaald, zijn de resultaten minder nauwkeurig dan men uit het voorafgaande zou verwachten. Zo kan men het sterke helderheidsverval aan de uiterste rand van de zonneschijf niet bijzonder nauwkeurig meten en ook is de absorptiecoëfficiënt van de zonnematerie voor de (ver-)ultraviolette straling onvoldoende bekend. Het gevolg is, dat het temperatuurverloop in de fotosfeer wel behoorlijk nauwkeurig bepaald is, maar dat onze kennis omtrent de temperaturen in de chromosfeer en de corona nog wel te wensen overlaat.

Is het temperatuurverloop met de diepte eenmaal vastgesteld, dan kan men het verloop van de gasdruk en van de dichtheid berekenen door de

gravitatiekracht van de zon op de buitenste gaslagen en de gaswetten van Boyle en Gay-Lussac in beschouwing te nemen. Het verschil in druk ΔP tussen twee lagen met diepten z en $z + \Delta z$ wordt gegeven door:

$$\Delta P = g\varrho\Delta z = \frac{\mu g}{RT} \times P \times \Delta z \qquad (4)$$

Hierin is μ het gemiddelde moleculairgewicht van het zonnegas, g de versnelling van de zwaartekracht, ϱ de dichtheid, P de gasdruk, R de gasconstante en T de temperatuur. Hoe heter het gas, des te kleiner is $\Delta P/\Delta z$. In een heet gas neemt de druk dus minder snel met de diepte toe dan in een koel gas. Tenslotte ontstaat een tabel van diepten (hoogten) met de bijbehorende temperaturen, gasdrukken en dichtheden; zo'n tabel (zie deel 2, II.2.2) noemt men een *model* van de zonne-atmosfeer.

Men vindt, dat in de diepste laag die voor waarneming nog goed toegankelijk is, een temperatuur heerst van 6630° Kelvin. De gasdruk is daar 0,15 atm.; de dichtheid 0,34 miljoenste g/cm³, dat is slechts één drieduizendste van de dichtheid van de lucht die wij inademen! In het overgangsgebied van de fotosfeer naar de chromosfeer, 250 km hoger, bereikt de temperatuur een dieptepunt van 4600°, ook de gasdruk en de dichtheid zijn hier aanzienlijk lager dan in de diepere lagen.

Het zal wellicht verwondering wekken, dat de zo ijle fotosfeer op 250 km diepte al ondoorzichtig is. Omstreeks 1940 ontstond het vermoeden, dat het gas in de fotosfeer ondoorzichtig wordt gemaakt door negatieve waterstofionen, dit zijn waterstofatomen, die nog één extra elektron zwakjes gebonden houden (omdat zo'n ion één elektron te veel heeft, is het dus negatief geladen). Deze betrekkelijk onstabiele ionen komen weliswaar in zeer zwakke concentraties voor (minder dan één op tien miljoen waterstofatomen), maar zij absorberen het licht in het nabij ultraviolette, het zichtbare en het infrarode gebied van het spectrum zeer sterk. Uit de randverzwakking, gemeten bij verschillende golflengten, heeft men niet alleen het temperatuurverloop in de fotosfeer kunnen afleiden, maar ook hoe de doorzichtigheid van de fotosfeer afhangt van de golflengte. Het verband dat men op deze wijze vindt, blijkt in het zichtbare en infrarode gebied van het spectrum inderdaad overeen te stemmen met de betrekking die men uit theorie en experiment voor negatieve waterstofionen gevonden heeft.

Alleen het buitenste schilletje van de zonnebol is dus voor waarneming toegankelijk; men vergelijke de 250 km diepte van de fotosfeer met de straal van de bol, die 700 000 km bedraagt! Uit de theoretische overwegingen blijkt, dat de temperatuur naar het centrum van de zon moet blijven toenemen; hetzelfde geldt voor de druk en de dichtheid (zie de

tabel in deel 2, II.2.2). Men berekent voor de temperatuur nabij het centrum 14×10^6 °K, voor de druk 20×10^6 atm. en voor de dichtheid 100 g/cm^3.

Bij deze zeer hoge temperaturen en dichtheden wordt in de meest centrale delen (tot ongeveer 100 000 km van het middelpunt) een grote energiestroom in de vorm van straling vrijgemaakt door thermonucleaire reacties waarbij waterstof wordt omgezet in helium. Deze energiestroom lekt door het zonnelichaam naar de fotosfeer, vanwaar de toegevoerde energie wordt uitgestraald in de ruimte.

Het energietransport geschiedt in de verschillende delen van de zon op verschillende wijzen. Van het centrum tot 600 000 km van het middelpunt wordt alle energie door straling vervoerd. Daarboven ligt een laag die thermisch onstabiel is; daarin ontstaan op grote schaal convectieve stromingen die voor het energievervoer zorg dragen. Deze laag die zich uitstrekt van direct onder de fotosfeer tot op 100 000 km diepte wordt daarom de convectiezone genoemd.

Een bel zonnegas die iets heter is dan zijn omgeving moet ook iets lichter zijn, zodat de bel gaat opstijgen. Daarbij komt de bel in een omgeving met een lagere druk waardoor het element uitzet. Deze expansie kost energie, zodat de gasbel afkoelt. Als de gasbel desondanks heter blijft dan zijn nieuwe omgeving, *blijft* de bel verder stijgen. In dat geval wordt de gaslaag thermisch onstabiel genoemd. Op een soortgelijke wijze kan men inzien dat in een thermisch onstabiele laag koelere elementen *blijven* dalen.

K. Schwarzschild heeft in 1906 een criterium opgesteld: in eerste benadering kan men convectie verwachten indien

$$\left(\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}z}\right)_{\text{adiabatisch}} < \left(\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}z}\right)_{\text{stralingsevenwicht}} . \qquad (5)$$

In deze ongelijkheid staat aan de linkerzijde de adiabatische temperatuurgradiënt, dit is de toeneming van de temperatuur met de diepte voor een stijgend heet of dalend koud element, wanneer er geen warmte met de omgeving wordt uitgewisseld. Aan de rechterzijde staat de temperatuurgradiënt voor stralingsevenwicht, dit is de toeneming van de temperatuur met de diepte die zich zou instellen wanneer de gehele energiestroom door straling zou worden vervoerd.

De convectiezone wordt gekenmerkt door het feit dat het gas vrij sterk, maar nog niet volledig, is geïoniseerd. Daardoor is de adiabatische temperatuurgradiënt klein: de energie die nodig is voor de expansie van een opstijgend element, wordt grotendeels geleverd door de recombinatie van ionen en elektronen tot atomen, zodat de temperatuur van de bel maar

weinig daalt. Anderzijds is de absorptiecoëfficiënt van een vrij sterk geïoniseerd gas zeer hoog, wat de doorstroming van straling sterk bemoeilijkt. Zou de gehele energiestroom in de vorm van straling door de laag moeten worden geperst, dan is daarvoor een zeer grote temperatuurgradiënt nodig. Dat maakt het rechterlid van de ongelijkheid (5) veel groter dan het linkerlid. Aan de ongelijkheid (5) wordt doorgaans niet of nauwelijks voldaan als *1* het gas weinig geïoniseerd is, of: *2* als de materie vrijwel volledig geïoniseerd is. Het eerste geval doet zich voor in de fotosfeer en het tweede in het gebied onder de convectiezone. Deze gebieden zijn in stralingsevenwicht, wat betekent dat er geen convectieve stromingen zijn en dat de gehele energiestroom door straling wordt vervoerd.

De bovengrens van de convectiezone ligt vlak onder de fotosfeer, op een diepte van slechts 300 km (zie de tabel in deel 2, II.2.2). In de bovenste lagen van de convectiezone zijn de snelheden hoog, ongeveer twee tot drie km per seconde; hierbij krijgen de stromingen een onregelmatig wervelend karakter. Men spreekt dan van turbulente convectie. In dit gebied wordt de aangevoerde convectieve energie vrijwel geheel in warmte omgezet en door de fotosfeer weer uitgestraald. In deel 2, II.4.4 zullen wij zien dat het gebied van de turbulente convectie een belangrijke rol speelt in de verklaring van de corona.

Hoewel de convectiezone zelf te diep ligt om direct waarneembaar te zijn, planten de temperatuur-ongelijkmatigheden en de snelheidsvelden zich nog voort tot in de fotosfeer en de chromosfeer. Dit veroorzaakt een aantal opmerkelijke verschijnselen.

In de inleiding noemden wij de granulatie (plaat 24) al. De heldere korreltjes, de granulae, hebben afmetingen van 600 tot 2000 km, zij hebben vaak een enigszins veelhoekige vorm. Het granulatiepatroon wisselt voortdurend, de individuele granulae bestaan gemiddeld slechts tien minuten. De granulatie wijst erop, dat in elk horizontaal vlak de temperatuur niet overal gelijk is. Uit de helderheidsverdeling volgt, dat in de diepe lagen van de fotosfeer de temperatuur in de heldere granulae ongeveer 1000° hoger is dan in de minder heldere materie daartussen. De eerder genoemde 6630° is dus een gemiddelde temperatuur.

Onder gunstige waarnemingsomstandigheden opgenomen spectra laten de spectrale lijnen zien als 'kronkellijnen' (plaat 31). Dit wijst op het voorkomen van verschillende snelheden in de lijnvormende laag (zie doppler-effect; deel 2, II.2.3). Een bocht naar het violet in een bepaald horizontaal strookje in het spectrum betekent, dat het bijbehorende stukje fotosfeer naar de waarnemer toe beweegt. De 'kronkels' wijzen op snelheden tot een paar km/sec omhoog en omlaag.

Een component van dit snelheidsveld hangt samen met de granulatie: in de heldere granulae stroomt materie omhoog en in de donkere tussenruimten vloeit gas naar beneden. Men kan dus zeggen dat de granulae hete elementen zijn, die uit de top van de convectiezone 'doorschieten' in de fotosfeer.

Daarnaast treden oscillaties op. Een reeks snel na elkaar genomen spectra laat zien, dat fotosferische gebieden met afmetingen van een paar duizend km en meer als één geheel een paar maal op- en neergaan; de periode van deze snel uitdempende trilling is circa vijf minuten. Deze trillingen in het fotosferische 'vlies' worden aangeslagen door 'opstoppers' uit de dieper gelegen convectiezone. Soms heeft men gezien dat een trilling wordt ingezet met het verschijnen van een bijzonder heldere granule.

Een bijzonder belangrijke component in het snelheidsveld, de supergranulatie, werd omstreeks 1960 ontdekt. De supergranulatie bestaat uit cellen van ronde of enigszins veelhoekige vorm, met middellijnen van 20 000 tot 40 000 km. Midden in zo'n cel welt het zonnegas verticaal omhoog, daarna stroomt het gas horizontaal en radieel uit, om aan de randen weer te dalen. De snelheden die daarbij optreden, zijn nog juist waarneembaar, slechts een paar honderd meter per seconde.

Waarschijnlijk onthult de supergranulatie een fundamenteel patroon van snelheden op grote schaal in de convectiezone (vergelijk de diameter van de cellen van 30 000 km met de totale diepte van de convectiezone van ongeveer 100 000 km). Men kan dit vermoeden nog niet theoretisch bewijzen, omdat de berekening van het snelheidsveld in de convectiezone uiterst ingewikkeld is. De huidige, sterk vereenvoudigde modellen van convectiezones zijn alleen maar in staat, het gemiddelde temperatuurverloop met de diepte redelijk goed te schatten.

Wij zullen nog zien in deel 2, II.5.2 dat de supergranulatie een grote rol speelt bij de ordening van de magnetische velden aan het zonne-oppervlak. Daaruit kan men dan de samenhang tussen de supergranulatie en het chromosferische netwerk (zie deel 2, II.4.1) begrijpen.

II.3.2 *Zonnevlekken en fakkels*

Zonnevlekken hebben diameters van 2000 tot 100 000 km. Vlekken met diameters groter dan ongeveer 5000 km (plaat 24) bestaan uit een donkere kern, de umbra, die omgeven wordt door een minder donker gebied, de penumbra. De kleinste vlekken, de poriën, bestaan alleen uit een soort umbra. De 'levensduren' lopen uiteen van een paar uur (voor veel kleine poriën) tot een paar maanden (voor de grootste vlekken).

Hoewel een umbra door de contrastwerking bijna zwart lijkt, blijkt de

helderheid in het groen ongeveer acht percent van de helderheid van de fotosfeer te bedragen. Voor het rode gebied van het spectrum vindt men twaalf percent. Uit deze getallen leidt men met de wet van Planck (zie deel 2, II.2.2) af, dat een umbra 2000° tot 2500° koeler is dan de fotosfeer. De wet van Saha (zie deel 2, II.2.3) kan kwantitatief verklaren dat in het spectrum van de umbra de atoomlijnen sterker en de ionlijnen zwakker zijn dan in het spectrum van de fotosfeer.

De veel lagere temperatuur is er ook de oorzaak van dat de lijnen van de moleculen die in de fotosfeer voorkomen (OH, CH, NH, MgH, C_2, CO, CN) veel sterker zijn in het spectrum van de umbra. Bovendien vertoont het spectrum van de umbra ook lijnen van moleculen die niet in de fotosfeer worden aangetroffen (bijvoorbeeld van TiO en CaH).

De helderheid van de penumbra bedraagt in het groen gemiddeld onge-

---

Plaat 27 Het spectrum van de fotosfeer. Het gedeelte loopt van 3900 Å (de grens tussen ultraviolet en violet) tot 5400 Å (groen). Boven het spectrum staan geschreven: de golflengte (in Å), de klassieke lettersymbolen voor de sterkste fraunhoferlijnen en de aanduidingen voor de waterstoflijnen (hier Hβ, Hγ en Hδ). Onder het spectrum is bij enkele lijnen aangegeven welke elementen ervoor verantwoordelijk zijn (opname op Mt. Wilson Observatory).

Plaat 28 Het flitsspectrum van de chromosfeer. Het gedeelte loopt van 3800 Å tot 4900 Å. De emissielijnen zijn krom, omdat het spectrum een aaneenschakeling is van éénkleurige beeldjes van het chromosfeersikkeltje dat tijdens de opname bij een zonsverduistering buiten de maansrand uitstak. De horizontale streperigheid ontstaat door de hobbeligheid van de maansrand. Vrijwel alle heldere lijnen zijn te identificeren met de donkere fraunhoferlijnen in het spectrum van de fotosfeer (vergelijk de bovengeschreven identificaties met die van plaat 27). Een uitzondering vormen de twee met verticale pijlen aangewezen heliumlijnen, die in het spectrum van de fotosfeer niet voorkomen. De heldere vlekjes, die door de horizontale pijlen worden aangegeven, vormen samen het spectrum van een protuberans, die aan de andere zijde buiten de maansrand uitstak (Nederlandse Eclipsexpeditie, 1952).

Plaat 29 Een gedeelte van de zon, gefotografeerd in het licht van de waterstof lijn Hα. In de actieve gebieden zijn vlekken, fakkels (helder) en filamenten (donker) zichtbaar (opname K. O. Kiepenheuer, Fraunhofer Institut, Freiburg).

Plaat 30 Twee verschillende spectroheliogrammen van de zon, opgenomen op 2 juli 1957. Rechts in Hα (waterstof), links in K3 (geïoniseerd calcium). Op de rechterfoto zijn de protuberansen als filamenten zichtbaar. De linkeropname laat duidelijk de fakkels en het chromosferische netwerk zien (opname M. C. Ballario, Arcetri).

veer 75 percent van de helderheid van de fotosfeer. Dit wijst erop dat de temperatuur in de penumbra ongeveer 500° lager is dan in de fotosfeer.

De penumbra vertoont veel structuur. Opvallend is de straalsgewijze tekening van lichte en donkere strepen (striae). Langs deze striae stroomt materie uit de penumbra naar de fotosfeer (Evershed effect). Uit het doppler-effect blijkt dat de snelheden van deze uitstroming het grootst zijn in de donkere striae, tot ongeveer zeven km per seconde. In de chromosfeer boven de penumbra en boven de omringende fotosfeer treedt daarentegen instroming op, hetgeen blijkt uit het doppler-effect zoals dat waargenomen wordt in de sterkste fraunhoferlijnen.

Zonnevlekken worden altijd omringd door heldere 'vlokken', de zogenoemde fakkels. In 'gewoon' licht zijn de fakkels het best zichtbaar dicht bij de rand van de zonneschijf; nabij het midden kan men ze bijna niet vinden (plaat 23). Hieruit leidt men af (met de redenering uiteengezet in deel 2, II.2.2), dat de fakkels in de *hoge* fotosfeer en in de chromosfeer een paar honderd graden heter zijn dan hun omgeving; diep in de fotosfeer moeten zij een beetje kouder zijn dan de omgeving. Met dit model

---

Plaat 31 'Kronkellijnen' in het zonnespectrum. Dit kleine gebiedje uit het groene spectrale gebied (5236-5251 Å) is met grote dispersie opgenomen; het gebiedje is met een balkje in plaat 27 aangegeven. Rechts van het spectrum is de spleet van de spectrograaf en het daarop geplaatste gedeelte van het zonsbeeld schematisch weergegeven. Het beeld van een kleine zonnevlek was op de spleet geplaatst. De dunne en scherpe donkere horizontale lijnen in het spectrum werden veroorzaakt door stofjes op de spleet. Waar de fraunhoferlijnen een bocht naar het violet (naar links) vertonen, kwam het corresponderende gedeelte van de zon naar de waarnemer toe (aangegeven door een — teken). Een bocht naar het rood correspondeert met een van de waarnemer af bewegend element van de zon (+ teken). Dit spectrum werd opgenomen op Mt. Wilson Observatory.

Plaat 32 Rustende protuberansen aan de rand van de zon (opname R. B. Dunn; Sacramento Peak Observatory).

Plaat 33 Filteropnamen van de zon in Hα. De linkeropname is gemaakt op 1 juni 1960 om 6.20 uur; de rechteropname om 9.05 uur. Op de rechteropname is een grote zonnevlam zichtbaar (opname K. O. Kiepenheuer, Fraunhofer Institut, Freiburg).

Plaat 34 Een lusprotuberans aan de rand van de zon (opname Sacramento Peak Observatory).

kan men ook verklaren dat de fakkels in het licht van sterke fraunhoferlijnen, zoals de lijnen van geïoniseerd calcium, bijzonder goed zichtbaar zijn over de gehele schijf (plaat 30). Immers, het licht in sterke spectrale lijnen is uit hogere lagen afkomstig dan het continue licht (deel 2, II.2.3). Het verschijnsel in de sterke fraunhoferlijnen wordt chromosferische fakkels of plages genoemd.

Uit de beste opnamen blijkt dat de fakkels bestaan uit groeperingen van kleine heldere puntjes, die afmetingen hebben niet groter dan 1000 km. Hoewel deze elementjes in grootte aan de normale granulatie doen denken, zijn hun eigenschappen geheel anders: een grillige verspreiding, een geheel ander temperatuurverloop met de diepte, een veel langere levensduur (een uur of meer).

De fakkels rijgen zich aaneen tot vlokkerige structuren die wij fakkelvelden zullen noemen. De helderheid, de dichtheid en de uitgestrektheid van een bepaald fakkelveld hangt sterk af van de soort licht waarin men waarneemt. In ieder geval is het fakkelveld duidelijk groter dan het totale oppervlak van de bijbehorende zonnevlekken.

Fakkelvelden ontstaan één dag of een paar dagen vóór het verschijnen van de zonnevlekken. De levensduur van een fakkelveld is een paar maal groter dan de levensduur van de zonnevlekken. Men neemt ook wel fakkels waar, waarin nimmer zonnevlekken worden gezien. Deze geïsoleerde fakkels zijn klein en zwak; men vindt ze vooral in de buurt van de polen, buiten de vlekkengordels (zie deel 2, II.1).

Wij beperken de bespreking van zonnevlekken en fakkels hier tot de beschrijving van de waarnemingen en enkele directe gevolgtrekkingen. Naderhand, in deel 2, II.5.3, zal blijken dat de oorzaak van vlekken en fakkels gezocht moet worden in sterke magnetische velden. Op hun rol in het geheel van de zonne-activiteit wordt ingegaan in deel 2, II.6.

II.4 CHROMOSFEER EN CORONA

II.4.1 *Chromosfeer*

De chromosfeer is de laag die aansluit op de bovenzijde van de fotosfeer. In dit gebied stijgt de temperatuur weer van 4600° tot ongeveer 20 000°. De dikte van deze laag bedraagt enkele duizenden kilometers, dat is dus vele malen meer dan de dikte van de fotosfeer. Toch is de totale hoeveelheid uitgestraald licht van de chromosfeer ongeveer duizend maal kleiner dan die van de fotosfeer. Dit is het gevolg van de geringere dichtheid, die bovendien van de basis naar de top van de chromosfeer afneemt met een factor duizend.

In deel 2, II.2.3 is al vermeld dat de lage chromosfeer de meeste straling uitzendt in een aantal sterke emissielijnen, vooral in die van waterstof, geïoniseerd calcium en helium. In hogere lagen, waar de temperaturen hoger zijn, is vooral de ultraviolette Lyman α lijn van waterstof bijzonder sterk. Bij nog hogere temperaturen zijn waterstof en helium volledig geïoniseerd, daar vindt men (hoofdzakelijk in het verre ultraviolet) een groot aantal emissielijnen van ionen van zwaardere elementen.

De chromosfeer vertoont een grote hoeveelheid naaldachtige structuren, die spicules worden genoemd (zie plaat 25). Deze spicules hebben diameters van ongeveer 1000 km; in vele gevallen bereiken zij hoogten van 10 000 tot 20 000 km boven de fotosfeerrand. De levensduren ervan bedragen slechts enkele minuten. In de lage chromosfeer zijn de spicules zo dicht op elkaar gepakt, dat men ze aan de rand niet meer afzonderlijk kan onderscheiden. Waarschijnlijk wordt vrijwel al het chromosferische licht door de spicules uitgezonden.

Uit de breedte van de spectrale lijnen vindt men in de chromosfeer hoge turbulente snelheden (deel 2, II.2.3), tot 15 km/sec toe. Een groot gedeelte van deze snelheden is waarschijnlijk het gevolg van uitstromende bewegingen in de spicules en van de voortplanting van schokgolven door de chromosfeer (zie deel 2, II.4.4).

In deel 2, II.2.3 hebben wij gezien, dat men in het licht van sterke fraunhoferlijnen chromosferische structuren op de schijf kan waarnemen. Opnamen in het licht van geïoniseerd calcium laten niet alleen de fakkels goed zien (deel 2, II.3.2), maar tonen bovendien het chromosferische netwerk (plaat 30). Dit is een systeem van heldere vlokjes, dat de gehele zonneschijf als een wat onregelmatig net overspant. De heldere vlokjes zijn wat kleiner en minder helder dan de fakkels. Met de ontdekking van de supergranulatie (deel 2, II.3.1) kwam tevens vast te staan, dat de heldere vlokken juist op de randen van de supergranulatiecellen liggen. Hieruit kan weer worden afgeleid dat een individuele supergranulatiecel of een 'maas' van het chromosferische netwerk ongeveer een etmaal bestaat.

De meeste waarnemers zijn het erover eens dat de spicules in bundels uitgaan van de heldere vlokken in het chromosferische netwerk. In deel 2, II.5.3 wordt verder ingegaan op de structuur in de chromosfeer.

II.4.2 *Corona en zonnewind*

In de hoge chromosfeer stijgt de temperatuur plotseling zeer sterk tot ruim een miljoen graden in de corona. De corona is zo ijl, dat de totale hoeveelheid uitgestraald licht ongeveer honderd tot duizend maal geringer is dan die van de chromosfeer. De corona straalt dus een miljoen

maal minder energie uit dan de fotosfeer. Alleen bij een totale zonsverduistering is de corona direct waarneembaar, onder gunstige omstandigheden tot een afstand van enkele zonnestralen (plaat 26). Het spectrum van de corona bestaat uit vier componenten:

1 Het volledig continue spectrum bestaat uit fotosfeerlicht, dat verstrooid wordt door vrije elektronen. Het feit, dat in het verstrooide licht geen fraunhoferlijnen te vinden zijn, leidt tot de conclusie, dat de corona een zeer hoge temperatuur moet hebben. De elektronen, die het licht verstrooien, bewegen zo snel, dat de fraunhoferlijnen door het dopplereffect helemaal verwazigd worden. Naar een Duits gebruik wordt deze elektronen-corona vaak de K-corona genoemd.

2 Het continue spectrum met donkere fraunhoferlijnen bestaat eveneens uit fotosfeerlicht, maar in dit geval verstrooid door stofdeeltjes. In de buitenste delen van de corona bevinden zich stofdeeltjes die afkomstig zijn uit de interplanetaire ruimte. Deze stof-corona wordt vaak de F-corona (F van Fraunhofer) genoemd. In tegenstelling tot de K-corona ziet men in de F-corona wel fraunhoferlijnen, omdat de stofdeeltjes veel langzamer bewegen dan de elektronen. De F-corona en het zodiakale licht (zie deel 2, I.6.3) gaan vloeiend in elkaar over; hetzelfde soort stofdeeltjes zorgt voor de verstrooiing van het fotosfeerlicht.

3 Een aantal heldere emissielijnen wordt door het coronagas zelf uitgestraald; deze lijnen zijn hoofdzakelijk afkomstig van sterk geïoniseerde elementen. Alle lijnen in het zichtbare gebied zijn zogenoemde 'verboden lijnen', die bij de veel hogere dichtheden in het laboratorium te zwak zijn om te kunnen worden waargenomen. De identificatie berust daarom op berekeningen. Uit de verhouding van de intensiteiten van enkele emissielijnen van eenzelfde element, in verschillende ionisatietoestanden, vindt men temperaturen tussen 1,5 en 2,5 miljoen graden. Ook uit de breedte van de lijnen kan de temperatuur worden bepaald. Men vindt dan een iets hogere waarde, maar waarschijnlijk zijn bewegingen in de corona verantwoordelijk voor een extra verbreding. De meest bekende coronalijnen zijn de rode lijn van negen maal geïoniseerd ijzer (afkomstig uit relatief koele gebieden) en de groene lijn van dertien maal geïoniseerd ijzer (uit de hete gebieden).

4 De continue straling van het coronagas zelf is in twee gebieden van het spectrum voldoende sterk om te kunnen worden gemeten. Bij golflengten van ongeveer 10-100 Å, dus in het gebied van de röntgenstraling, is met behulp van raketten en satellieten een zwakke straling gemeten. Anderzijds vindt men een continue emissie bij heel grote golflengten, van enkele decimeters tot vele meters, dus in het gebied van de radiostraling.

In het radiogebied is de zonnematerie ondoorzichtiger naarmate de

golflengte groter is. Het gevolg is dat de straling met een golflengte van een paar mm vrijwel geheel uit de lage chromosfeer afkomstig is, terwijl straling met golflengten van een meter of meer geheel uit de corona komt.

De corona is verre van homogeen. Aan de polen ziet men een groot aantal bundels, die zich van de tussengelegen ruimte onderscheiden door hun grote helderheid. Op lagere breedten vertonen zich dikwijls uitlopers ('streamers') en verdichtingen (coronacondensaties), die de vorm van de corona grotendeels bepalen (zie deel 2, II.6.2). De vorm van de corona is bovendien veranderlijk. Op kleinere schaal constateert men veranderingen van dag tot dag. Het globale uiterlijk vertoont een periodieke verandering in de loop van ongeveer elf jaar (zie deel 2, II.6.6).

De temperatuur van de corona is zo hoog, dat deze atmosfeer onmogelijk in rust kan verkeren. De buitenste lagen kunnen de aantrekkingskracht van de zon overwinnen, waardoor de corona expandeert, zodat er voortdurend zonnematerie de interplanetaire ruimte instroomt. De ontsnapte materie moet uit diepere lagen worden aangevuld. Deze stroom van deeltjes wordt de zonnewind genoemd.

Dichtbij de zon is de snelheid van de zonnewind gering. Naarmate de afstand toeneemt, wordt het relatieve verschil tussen de gradiënt van de gasdruk van de corona en het gewicht van het coronagas steeds groter, hetgeen een toenemend snelle uitstroming tot gevolg heeft. Op een afstand van ongeveer tien miljoen kilometer van de zon bedraagt de snelheid enkele honderden kilometers per seconde; dit is meer dan de geluidssnelheid in het interplanetaire medium. Het gas heeft ongeveer vier dagen nodig om de afstand van de zon naar de aarde af te leggen. Deze getallen zijn overigens sterk afhankelijk van de temperatuur van de corona. Voor een temperatuur van één miljoen graden berekent men, dat de snelheid van de zonnewind in de buurt van de aardbaan 400 km/sec bedraagt. Voor een coronatemperatuur van twee miljoen graden vindt men voor deze snelheid 750 km/sec. Boven de hete gebieden zal de uitstroming dus veel sneller zijn dan boven de koelere gebieden.

Door de zonnewind verliest de zon 10^{14} gram per seconde. Dit betekent, dat de zon op deze wijze in de loop van vijf miljard jaar slechts één percent van zijn massa verliest.

II.4.3 *Rustende protuberansen en filamenten*

In de inleiding (deel 2, II.1) werd de aandacht al gevestigd op de protuberansen die men bij zonsverduisteringen als purperrode wolken in de corona ziet hangen. Protuberansen kunnen ook zonder een zonsver-

duistering buiten de zonsrand worden waargenomen (plaat 32). Fotografeert men in het licht van de rode waterstoflijn Hα, dan tekenen de protuberansen zich als donkere linten (filamenten) op de zonneschijf af (plaat 29 en 30).

Uit de fotografische opnamen blijkt dat protuberansen (= filamenten) grillig gevormde, lange en dunne kammen zijn, die vrijwel loodrecht op het zonne-oppervlak staan. Een flinke protuberans is ongeveer 200 000 km lang, 50 000 km hoog en 10 000 km dik. Een protuberans vertoont een structuur van fijne draden en knobbeltjes (plaat 32).

Het spectrum van een protuberans lijkt op het spectrum van de chromosfeer. Uit de verschillende emissielijnen vindt men ietwat uiteenlopende temperaturen, van 5000 tot 10 000°, dezelfde temperaturen die men ook in de chromosfeer vindt.

Vergelijken wij de protuberans met de omringende corona, dan blijkt de temperatuur in de protuberans ruim honderd maal kleiner te zijn, maar de dichtheid is ruim honderd maal groter. Hieruit volgt dat de gasdruk in de protuberans (die immers evenredig is met de temperatuur en met de dichtheid) ongeveer even groot is als de gasdruk van de omringende corona. Met dit drukevenwicht zijn niet alle vragen opgelost. Welke krachten beletten de zware protuberansen om neer te storten? Hoe ontstaat zo'n koele, zware wolk en wat zorgt voor voldoende thermische isolatie tegen de hitte in de corona? In deel 2, II.5.2 zal blijken dat magnetische velden daarbij een belangrijke rol spelen.

Het hier besproken type is de veel voorkomende rustende protuberans, die weken of maanden kan blijven bestaan. Wel ziet men veranderingen in de vorm optreden; vooral de fijne structuur verandert sterk in soms enkele uren of minuten. Voortdurend ziet men materie neervloeien naar de chromosfeer. In deel 2, II.6.3 worden eruptieve protuberansen en enkele andere typen besproken.

II.4.4 *Verhitting van chromosfeer en corona*

In deel 2, II.3.1 zagen wij dat in de bovenste lagen van de convectiezone, juist onder de fotosfeer, een gebied van turbulente convectie aanwezig is. Door de turbulente bewegingen ontstaan verdichtingen en verdunningen in het gas, die zich in alle richtingen als geluidsgolven voortplanten met de snelheid van het geluid ter plaatse (ongeveer zeven km/sec). Op deze wijze verlaat een stroom mechanische energie de convectiezone. Hoewel deze mechanische energiestroom ongeveer duizend maal kleiner is dan de stralingsstroom van de fotosfeer, is deze zwakke energiestroom geheel verantwoordelijk voor de hoge temperatuur (en dus voor het bestaan) van de corona.

De mechanische energiestroom, F, is gelijk aan de kinetische energie van de deeltjes per cm³ ($\frac{1}{2}\,\varrho v^2$), vermenigvuldigd met de geluidssnelheid, c_g, dus

$$F = \tfrac{1}{2}\,\varrho v^2 \times c_g \qquad (6)$$

Hier is ϱ de dichtheid, dit is de massa van 1 cm³ zonnematerie op een bepaalde hoogte in de atmosfeer, en v de gemiddelde snelheid van de trillende deeltjes op die hoogte.

Bij de voortplanting naar buiten neemt de energiestroom aanvankelijk heel weinig af, want er is weinig dissipatie in de fotosfeer. Anderzijds neemt de dichtheid, ϱ, zeer sterk af met de hoogte. Uit bovenstaande formule ziet men, dat de snelheden waarmee de deeltjes trillen, sterk zullen moeten toenemen. Op die manier gaan de geluidstrillingen in schokgolven over. Schokgolven bezitten de eigenschap, dat ze veel gemakkelijker dan geluidsgolven energie aan het gas kunnen overdragen en op deze wijze het gas verwarmen. Deze overgang van geluidsgolven in schokgolven voltrekt zich reeds in de bovenste lagen van de fotosfeer. De temperatuur zal dientengevolge weer stijgen en het gas zal de geabsorbeerde mechanische energie uitstralen. Dit gebied, waar de temperatuur naar buiten toe begint te stijgen, is de chromosfeer.

Tenslotte komen de schokgolven in de corona die al zo ijl is, dat het gas de geabsorbeerde energie van de schokgolven niet meer volledig kan uitstralen. Het gas neemt daardoor de zeer hoge temperatuur aan van ruim een miljoen graden. Bij zo'n hoge temperatuur is het warmtegeleidingsvermogen zo groot, dat een groot gedeelte van de toegevoerde energie door geleiding naar de chromosfeer wordt teruggevoerd.

Het gedeelte van de mechanische energiestroom uit de convectiezone, dat door de chromosfeer heendringt, wordt gedeeltelijk door geleiding naar de chromosfeer teruggevoerd, gedeeltelijk door de corona uitgestraald en gedeeltelijk gebruikt voor het aandrijven van de zonnewind.

II.5 MAGNETISCHE VELDEN

II.5.1 *Waarnemingen: methoden en resultaten*

In het begin van deze eeuw ontdekte de Amerikaan G. E. Hale, dat in zonnevlekken sterke magneetvelden optreden. Deze vondst volgde op de ontdekking van de Nederlander P. Zeeman, dat de meeste spectrale lijnen, die uitgezonden worden door een gas in een sterk magnetisch veld, worden gesplitst in een aantal componenten (zeeman-effect). Bij vrij veel spectrale lijnen ziet het patroon er als volgt uit: Kijkt men *langs* de veld-

lijnen van het magneetveld (het longitudinale geval), dan ziet men de spectrale lijn gesplitst in twee componenten waarvan de ene component linksdraaiend en de andere rechtsdraaiend circulair gepolariseerd is. Loodrecht op de veldlijnen (het transversale geval) ziet men drie componenten, waarvan de middelste niet verplaatst is en lineair gepolariseerd is. Ook de buitenste componenten zijn lineair gepolariseerd, in een richting loodrecht op de polarisatierichting van de middelste component. De afstand van de componenten is evenredig met de sterkte van het magneetveld; de sterkteverhoudingen en de aard van de polarisatie van de componenten geven de hoek tussen de richting van waarneming en de magnetische veldlijnen ter plaatse van de lichtbron.

Gebruik makend van het zeeman-effect, meet men in umbrae van zonnevlekken (zie deel 2, II.3.2) veldsterkten van 1500 tot 3500 gauss. Dit zijn sterke velden, zoals een vergelijking met de veldsterkte aan de aardse polen (0,3 gauss) laat zien. In de penumbra neemt de veldsterkte snel af tot ongeveer 200 gauss aan de buitenrand. De veldlijnen vormen een waaier: in de umbra staat het magneetveld vrijwel loodrecht op het zonne-oppervlak; aan de buitenrand van de penumbra lopen de veldlijnen bijna evenwijdig met het oppervlak.

Het meten van veldsterkten kleiner dan duizend gauss wordt wat moeilijker omdat de zeeman-componenten elkaar dan overlappen. Wel blijft, bij een longitudinaal veld, de ene zijde van de lijn iets meer linksdraaiend gepolariseerd en de andere zijde iets meer rechtsdraaiend. Door van polarisatie-optiek gebruik te maken, kan men met fotografische technieken nog magneetvelden meten zolang de veldstukken groter zijn dan tien gauss.

Met een magnetograaf wordt uit het foto-elektrisch gemeten verschil in polarisatie tussen beide lijnflanken de magnetische veldsterkte bepaald en geregistreerd. Op deze wijze kan men een magnetische kaart (magnetogram) van een gedeelte van de zonneschijf maken. De meeste magnetografen meten alleen de longitudinale component van de magnetische velden. De gevoeligheid kan tot een fractie van één gauss worden opgevoerd, maar zo'n hoge gevoeligheid kan alleen worden bereikt, als men middelt over een vrij groot oppervlak van de zon (5×10^6 km^2 of meer) of over een vrij lange tijd. Men heeft magnetografen ontwikkeld, die ook de transversale component van de magnetische velden kunnen meten, maar de gevoeligheid is dan honderd maal kleiner dan bij metingen van longitudinale velden.

Buiten de zonnevlekken treden de sterkste velden op in de fakkelvelden (zie deel 2, II.3.2). De veldsterkte verandert grillig van punt tot punt, men meet binnen één fakkelveld waarden van ongeveer tien tot enkele hon-

derden gauss. Duidelijk is vast komen te staan dat een meetbaar verticaal magneetveld altijd correspondeert met een helder vlokje in opnamen in het licht van lijnen van geïoniseerd calcium, en omgekeerd. Dit geldt niet alleen voor de fakkels, maar ook voor de heldere vlokjes van het chromosferische netwerk (zie deel 2, II.4.1), waar men een gemiddelde veldsterkte van tien tot twintig gauss meet.

Bij de in fakkels en het chromosferische netwerk gemeten veldsterkten moet bedacht worden dat deze waarden gemiddeld zijn over een zeker oppervlak. Het lijkt niet uitgesloten dat alle magnetische velden geconcentreerd zijn in gebieden van de fotosfeer met veldsterkten van bijvoorbeeld ten minste honderd gauss; deze magnetische gebieden kunnen plaatselijk heel klein van afmeting zijn. De fijne puntjes die in fakkels zijn waargenomen (deel 2, II.3.2) wijzen in die richting. In ieder geval ziet men, dat de magnetische gebiedjes steeds kleiner en de veldsterkten daarin steeds groter worden, naarmate de waarnemingstechniek beter wordt.

Buiten de vlekkengordels, bij de polen, vindt men een uiterst onregelmatig magneetveld dat gemiddeld zwak is, ongeveer een gauss of minder. Sterkte en polariteit veranderen met de activiteitscyclus (deel 2, II.6.6).

Het is opmerkelijk, dat bijna alle in de fotosfeer gemeten magneetvelden vrijwel loodrecht op het zonne-oppervlak staan. Sterk hellende magnetische velden worden alleen gevonden in de buurt van of tussen sterke verticale velden: in penumbrae en plaatselijk in fotosferische gebieden tussen zonnevlekken.

Onderstaande tabel vat de in de fotosfeer gemeten magnetische veldsterkten samen:

<table>
<tr><td>umbrae van vlekken</td><td>1500 – 3500 gauss</td><td></td></tr>
<tr><td>fakkelvelden</td><td>10 – 200 gauss</td><td rowspan="3">de werkelijke, in kleine gebieden geconcentreerde velden kunnen aanzienlijk sterker zijn</td></tr>
<tr><td>chromosferisch netwerk = randen supergranulatiecellen</td><td>10 – 20 gauss gemiddeld</td></tr>
<tr><td>gemiddeld veld aan de polen</td><td>veranderlijk, ten hoogste 1 gauss</td></tr>
</table>

II.5.2 *Eigenschappen van magnetische velden*

Magnetische velden wijzen op de aanwezigheid van elektrische stromen ergens in het gebied van het veld. In het laboratorium houdt een spoel een magnetisch veld in stand, zolang er een elektrische stroom door de windingen van de spoel loopt. Zo moeten ook in de zon elektrische stromen voorkomen, die samenhangen met de gemeten magnetische velden. Het geleidingsvermogen van het zonnegas is hoog wegens de grote beweeglijkheid van de vrije elektronen. Zelfs het fotosfeergas dat maar zwak geïoniseerd is (daar komt slechts één elektron en één positief ion voor op een paar duizend neutrale atomen), heeft een geleidingsvermogen dat overeenkomt met het geleidingsvermogen van een sterke zoutoplossing.

Elektrische stromen vertonen de eigenschap nog enige tijd door te lopen nadat de elektromotorische kracht, die de stroom deed ontstaan, verdwenen is. Men kan dit waarnemen bij een spoel, wanneer men de stroombron uitschakelt. De wet van Lenz beschrijft wat er gebeurt: bij het uitschakelen van de stroombron zal de sterkte van het magnetische veld afnemen, maar zodra het magnetische veld verandert, wordt in de spoel een stroom opgewekt, die de verandering van het magneetveld tegenwerkt, zodat er dus een inductiestroom gaat lopen in de richting van de oorspronkelijke stroom. Hoe groter de diameter van de spoel en hoe hoger het geleidingsvermogen van de draad, des te langzamer neemt de elektrische stroom (en de magnetische veldsterkte) af. De vervaltijd of de diffusietijd is de tijd waarin de magnetische veldsterkte tot ongeveer één derde van de oorspronkelijke waarde is gedaald. In het laboratorium bedragen de vervaltijden ten hoogste enkele seconden. Magnetische velden in de zon worden daarentegen gekenmerkt door zeer lange diffusietijden, omdat de afmetingen van de stroomsystemen zo groot zijn. De orde van grootte van diffusietijden van kosmische magneetvelden, τ, kan worden gesteld op:

$$\tau = \frac{4\pi\sigma l^2}{c^2} \tag{7}$$

Hierin is σ het geleidingsvermogen (in e.s.e.), l de karakteristieke afmeting van het stroomsysteem (in cm) en c de lichtsnelheid (in cm/sec). Voor een grote zonnevlek vindt men een vervaltijd van 300 jaar, wanneer men voor l een diameter van 30 000 km invult en voor $\tau = 10^{13}$ e.s.e. Voor een algemeen magneetveld van de gehele zon berekent men een diffusietijd van ongeveer tien miljard jaar, hetgeen vergelijkbaar is met de ouderdom van het heelal (zie deel 4, v).

De geleidende zonnematerie kan wel langs de veldlijnen van een mag-

netisch veld vloeien, maar niet loodrecht daarop. Men drukt dit beeldend uit door te zeggen dat het magnetische veld in de zonnematerie is 'ingevroren'. Wat er gebeurt, hangt af van de verhouding tussen de sterkte en de schaal van het snelheidsveld en de sterkte en de schaal van het magnetische veld. Een klein element met een geringe snelheid loodrecht op de magnetische veldlijnen wordt vrijwel direct gestopt. De reden is dat in het element een inductiestroom ontstaat, waarop een lorentzkracht werkt in de richting tegengesteld aan de snelheid. Een snelheidsveld van zeer grote schaal zal een veel kleiner magnetisch gebiedje geheel meeslepen, met de zich daarin bevindende materie en met het bijbehorende systeem van elektrische stromen.

De magnetische krachten laten zich overzichtelijk beschrijven door middel van magnetische drukken en spanningen. Beschouw een bundel veldlijnen; daarin heerst een magnetische druk, ter grootte van $H^2/8\pi$ dyne/cm^2, waarin H de veldsterkte in gauss is. De bundel tracht dus te expanderen. Daarnaast is er een spanning langs de veldlijnen, waardoor de veldlijnen zich trachten te verkorten. Deze magnetische spanning is te vergelijken met de spanning langs een snaar.

Wil een magnetisch gebied in evenwicht zijn met de omgeving, dan is in het algemeen een uitwendig krachtenveld nodig, dat de magnetische krachten juist in evenwicht houdt. Er zijn echter twee soorten velden die in evenwicht zijn zonder dat daar een uitwendig krachtenveld voor nodig is: potentiaalvelden en krachtvrije velden. In het gebied waar geen stromen lopen, vindt men potentiaalvelden; een voorbeeld is het veld om een (elektro)magneet. In krachtvrije velden lopen er wel stromen; de configuratie is dan echter zodanig dat de stromen precies langs de magnetische veldlijnen lopen.

II.5.3 *De rol van magnetische velden in zonneverschijnselen*

Uit het sterke magnetische veld in een zonnevlek (zie deel 2, II.5.1) kan men de overige verschijnselen (deel 2, II.3.2) in grote trekken begrijpen. Dit magnetische veld steekt als een verticale buis veldlijnen in het gebied van de convectiezone. In dit sterke magnetische veld is de normale convectie onmogelijk, want weliswaar kunnen hete bellen gas langs de veldlijnen omhoog stromen, maar de magnetische spanning verzet zich tegen de expansie van deze elementen. Daarom zal zich een andere wijze van energievervoer instellen, die minder efficiënt is, zodat een kleinere energiestroom de umbra bereikt. De umbra straalt dus een veel kleinere energiestroom uit en neemt daardoor een lagere temperatuur aan dan de fotosfeer.

Aangezien de temperatuur in de umbra en de daaronder gelegen veld-

buis lager is dan in de omringende fotosfeer en convectiezone, moet ook de gasdruk in de veldbuis lager zijn dan in de omgeving. Het magnetische veld stelt zich zo in dat de magnetische druk in de veldbuis precies het verschil opheft tussen de gasdruk in de buis en de gasdruk daarbuiten.

Zondert men de kleinste vlekken uit, dan blijken noch de temperaturen noch de magnetische veldsterkten van de grootte van de vlek af te hangen. Wellicht betekent dit dat de onderling samenhangende temperaturen, drukken en magnetische veldsterkten in de umbrae het gevolg zijn van een 'tweede evenwichtstoestand' met een verticaal magnetisch veld van ettelijke duizenden gauss in de bovenste lagen van de convectiezone. Deze 'tweede evenwichtstoestand' moet dan kunnen bestaan naast de normale evenwichtstoestand in de convectiezone, waar geen magnetisch veld van enige betekenis heerst.

In poriën, die wat helderder zijn dan umbrae, meet men kleinere veldsterkten: 1500 tot 2500 gauss, tegenover 2500 tot 3500 gauss in umbrae. Dit verschil is toe te schrijven aan de verwarming van de bovenste lagen van de porie door de straling die uit de omgeving zijdelings doordringt tot binnen in de porie. Aangezien de doorzichtigheid van het zonnegas snel afneemt met de diepte, beïnvloedt de zijdelingse instraling de structuur van de diepere delen van de porie vrijwel niet.

Men kan aantonen dat in de bovenste duizenden kilometers van de convectiezone nog geïsoleerde magnetische structuren mogelijk zijn met diameters vele malen kleiner dan de kleinste poriën of zelfs kleiner dan de kleinste structuren met diameters van 500 km, die nog te onderscheiden zijn met de huidige waarnemingsmiddelen. De zijdelingse instraling maakt het begrijpelijk dat men in wit licht geen poriën ziet, die diameters hebben kleiner dan ongeveer 2000 km. Men ziet echter wel gebiedjes met diameters van duizend km, die zich in wit licht niet duidelijk van de normale fotosfeer onderscheiden, maar die toch magnetische veldsterkten hebben van ongeveer duizend gauss. Hale noemde deze gebiedjes 'onzichtbare zonnevlekken'.

Wij zagen reeds dat ook fakkels worden gekenmerkt door magnetische velden en dat er aanwijzingen zijn dat deze velden geconcentreerd zijn in kleine gebiedjes met vrij grote veldsterkten, van ongeveer een paar honderd gauss. Het verschil tussen de fakkels en de heldere vlokjes in het chromosferische netwerk is slechts gradueel. Het lijkt nu een aantrekkelijke hypothese, één type magnetische 'tweede evenwichtstoestand' te onderstellen in een vrijwel verticale veldbuis tot vele duizenden kilometers diepte in de convectiezone. Dat wat zich in fotosfeer en chromosfeer manifesteert, zou dan alleen nog van de middellijn van de veldbuis afhangen, de grootste afmetingen geven aanleiding tot zonnevlekken, de

kleinste tot de heldere fijne structuurtjes in het chromosferische netwerk, volgens het schema:

zonnevlekken – poriën – 'onzichtbare zonnevlekken' – fakkels – heldere vlokjes in chromosferisch netwerk.

Fakkels en elementen uit het netwerk tekenen helder af tegen de omgeving, wat erop wijst dat in de hoge fotosfeer en lage chromosfeer de temperatuur in deze structuren iets hoger is dan in de omgeving (deel 2, II.3.2). Men schrijft dit toe aan de opwekking van wat sterkere geluidsgolven in de magnetische gebieden, waardoor chromosfeer en corona sterker worden verhit (vergelijk deel 2, II.4.4). Inderdaad blijken ook de hoge chromosfeer en de corona boven de fakkels heter te zijn dan boven de normale chromosfeer (deel 2, II.6.2 en 4).

Ook bij rustende protuberansen of filamenten (deel 2, II.4.3) spelen magnetische velden een dominerende rol. Op de schijf ziet men de filamenten meestal duidelijk de grenslijn volgen tussen de tegengestelde polariteiten van het magnetische veld in de fotosfeer daaronder. Waarschijnlijk loopt het veld ter plaatse van de protuberans daarom vrijwel evenwijdig met het zonne-oppervlak.

Ontstaan en stabiliteit van een protuberans kunnen als volgt beschreven worden: zodra het coronagas zich plaatselijk een beetje verdicht, kan het gas door de hogere dichtheid meer energie uitstralen. Daardoor koelt het gas af en verdicht zich verder. Terwijl dit 'condensatieproces' voortschrijdt, gaat de zwaardere wolk zakken en neemt het 'ingevroren' magnetische veld mee. Daardoor worden de veldlijnen 'ingedeukt' totdat tenslotte de magnetische kracht opgewekt door de spanning langs de veldlijnen de wolk 'draagt'. Het magnetische veld isoleert de protuberans tegen de hitte van de corona.

Het chromosferische netwerk (deel 2, II.4.1) ligt juist over de randen van de cellen van de supergranulatie (deel 2, II.3.1). De dunne verticale veldbuisjes die verantwoordelijk zijn voor de heldere vlokjes in het netwerk, worden door het snelheidsveld van de supergranulatie meegevoerd naar de randen van de cellen. Daar worden de veldbuisjes achtergelaten, want het zonnegas stroomt nu zonder hinder langs de veldlijnen naar beneden. Hier worden dus magnetische velden van kleine schaal door snelheidsvelden van grote schaal meegevoerd.

De spicules (deel 2, II.4.1) steken uit de vlokken van het netwerk als spelden uit een speldenkussen. Hoewel de discussies over de aard van de spicules nog niet tot overeenstemming hebben geleid, lijkt wel vast te

staan dat de spicules het magnetische veld in de chromosfeer volgen.
De poolbundels in de corona zullen eveneens de magnetische veldlijnen volgen. Op de grotere coronastructuren (uitlopers) komen wij in deel 2, II.6.4 nog terug.

In de convectiezone en in de fotosfeer zijn de magnetische drukken in zonnevlekken en fakkels kleiner dan de gasdrukken; daar brengen de magnetische drukken juist het evenwicht tot stand tussen de gasdrukken binnen en buiten de magnetische structuren. In de corona daarentegen overtreft de magnetische druk de gasdruk al bij een veldsterkte van één gauss. Daarom verwacht men daar potentiaalvelden of krachtvrije velden.

II.6 ZONNE-ACTIVITEIT

II.6.1 *De actieve gebieden en de rustige zon*

Zonnevlekken, fakkels en protuberansen zijn tijdelijke verschijnselen, waarbij magnetische velden een dominerende rol spelen. Men vindt deze verschijnselen ruimtelijk bijeen in vrij scherp te omgrenzen gebieden die men, met de daarboven gelegen gedeelten van de corona, actieve gebieden noemt. De overige gedeelten van de zon noemt men de rustige zon (-fotosfeer, -chromosfeer, . . .). De betiteling 'rustig' is wel wat misleidend. De 'rustige' verschijnselen omvatten:

1 de verschijnselen waarbij magnetische velden geen rol van betekenis spelen (granulatie, supergranulatie, oscillaties);

2 de verschijnselen waarbij magnetische velden wel belangrijk zijn (chromosferisch netwerk, spicules), maar die vrij regelmatig over het *hele* zonne-oppervlak verdeeld zijn.

De verschijnselen van de rustige zon hebben individueel beperkte levensduren, maar zij zijn *altijd* aanwezig in een vrij dichte pakking.

II.6.2 *Een actief gebied; langzaam veranderlijke verschijnselen*

Een aantal langzaam veranderlijke verschijnselen in een actief gebied hebben wij al afzonderlijk besproken. Het fakkelveld is gedurende een groot deel van de levensloop van het gebied herkenbaar; in de laatste fase worden de fakkels heel zwak en zij liggen dan wijd verspreid. Zonnevlekken treden alleen in de eerste fase op.

De zonnevlekken verschijnen vaak als groepen in een fakkelveld. Zo'n groep is doorgaans langgerekt, met de lange as bijna evenwijdig aan de zonne-equator. In een vlekkengroep vindt men meestal vlekken van tegengestelde magnetische polariteit; in ieder geval tonen de fakkels tegengestelde polariteiten.

In de meeste gevallen is het actieve gebied duidelijk bipolair: vlekken en fakkels van de polariteit 'noord' liggen aan één zijde, gescheiden van de vlekken en fakkels van de polariteit 'zuid' aan de andere zijde van het gebied. Ook als het gebied complex is (wanneer de magnetische polariteiten dooreen liggen), heffen beide polariteiten elkaar juist op. Daarom is een actief gebied een gesloten eenheid, want alle magnetische veldlijnen die bij de polariteit noord uit de fotosfeer treden, zullen binnen hetzelfde actieve gebied weer in de polariteit zuid terugkeren.

De rustende protuberansen ontwikkelen zich doorgaans op de grens van de tegengestelde polariteiten, hetzij in het fakkelveld, hetzij aan de naar de pool gekeerde zijde. Dit hangt samen met het feit dat protuberansen alleen kunnen ontstaan waar het magnetische veld in de corona vrijwel evenwijdig is met het zonne-oppervlak (zie deel 2, II.5.3).

De corona boven een actief gebied is veel helderder dan de corona boven de rustige zon; zo'n helder gebied wordt een langdurige coronacondensatie genoemd. De dichtheid in zo'n koepelvormige coronacondensatie is vijf tot tien maal zo groot als in de rustige corona; ook is de temperatuur in de condensatie nog wat hoger, ongeveer twee miljoen graden. Niet zelden ziet men een structuur van bogen, die men in verband brengt met de boven het gebied gesloten magnetische veldlijnen.

Uit de coronacondensaties ontwikkelen zich boven de protuberansen de lange uitlopers die de vorm van de corona grotendeels bepalen wanneer er tenminste enige zonne-activiteit is (plaat 26).

II.6.3 *Snelle en eruptieve verschijnselen; zonnevlammen*

In een actief gebied treedt een groot aantal snelle en eruptieve verschijnselen op, met tijdsduren van enkele uren tot enkele minuten. Wij beperken ons hier tot de meest opvallende optische verschijnselen; enkele verschijnselen in de radio- en röntgenstraling worden besproken in deel 2, II.6.4.

Rustende protuberansen kunnen plotseling verdwijnen. Vaak ziet men eerst de inwendige bewegingen van de fijne structuren toenemen, waarna de protuberans in enkele uren geheel verdwijnt. In de meeste gevallen vloeit de materie langs fraai gebogen lijnen (blijkbaar de magnetische veldlijnen) naar de chromosfeer omlaag. Soms wordt de protuberans eruptief, waarbij het grootste deel van de massa met snelheden van vele honderden km/sec stijgt, hetgeen men tot vele honderdduizenden km hoogte volgen kan. Doorgaans valt de materie in de chromosfeer terug, soms ontsnapt een gedeelte de interplanetaire ruimte in.

Het plotseling verdwijnen van protuberansen wordt veroorzaakt door

een verandering in de structuur van het magneetveld. Dit blijkt onder meer uit het feit dat de verdwijning in een aantal gevallen samenvalt met de geboorte van een nieuw actief gebied dicht bij de protuberans. Een kleine verandering in het magnetische veld zal het kritische evenwicht tussen zwaartekracht en magnetische krachten (deel 2, II.5.3) verstoren, zodat de materie afglijdt langs de veldlijnen. Een eruptieve protuberans wijst op een plotselinge opstijging van het magnetische veld in de corona. In ongeveer twee-derde van de gevallen keert de protuberans binnen een paar dagen na de plotselinge verdwijning terug in vrijwel dezelfde vorm. In deze gevallen heeft het magnetische veld blijkbaar slechts een geringe blijvende verandering ondergaan.

Vlamtongen zijn kortstondige protuberansen in snelle beweging. Materie wordt uitgestoten langs een vrij smal spoor, waarbij snelheden tot vele honderden km/sec worden bereikt. Meestal valt de materie terug, vaak langs dezelfde baan, soms beschrijft de materie een boog. Het hele verschijnsel duurt tien tot twintig minuten. Vlamtongen treden vaak, maar niet uitsluitend, bij zonnevlammen op.

Zonnevlammen zijn de grootste spektakels in een actief gebied. In het licht van de rode lijn Hα van waterstof ziet men in enkele minuten een gedeelte van het fakkelveld sterk oplichten (plaat 33). Bij sterke zonnevlammen wordt Hα zelfs een emissielijn. Het verschijnsel dooft uit in ongeveer vijftien minuten (kleine vlammen) tot een paar uur (zeer grote en sterke vlammen). In het zichtbare gebied zijn vlammen alleen in de kernen van vrij sterke tot zeer sterke fraunhoferlijnen zichtbaar. Zeer zelden is een klein gebiedje van een bijzonder grote en heldere vlam in wit licht te zien. Hieruit volgt dat een zonnevlam zich geheel *boven* de fotosfeer afspeelt. Uit het spectrum vindt men wat hogere temperaturen dan normaal, tussen 10 000° en 20 000°, maar wel blijkt de deeltjesdichtheid plaatselijk honderd tot duizend keer groter te zijn dan in de normale chromosfeer. Uit spectroscopisch onderzoek is afgeleid dat een vlam een fijne structuur bezit van draden en/of knopen met dikten van slechts enkele tientallen km (deze structuren zijn veel te klein om direct te kunnen worden waargenomen). Chromosferische zonnevlammen verheffen zich tot een hoogte van enkele duizenden tot vele tienduizenden km, tot in de corona dus.

Bij sterke zonnevlammen speelt de corona zelf ook duidelijk mee. Dan treedt in de langdurige coronacondensatie (zie deel 2, II.6.2) van het actieve gebied een kortstondige coronacondensatie op, waarbij de dichtheid soms wel honderd maal zo groot wordt als in de rustige corona. De groene coronalijn (van dertien maal geïoniseerd ijzer) treedt versterkt op en in extreme gevallen komt zelfs de gele coronalijn (van veertien maal

geïoniseerd calcium) te voorschijn, hetgeen wijst op temperaturen van vier miljoen graden of meer. Deze verschijnselen in de corona vallen in tijd samen met het hoogtepunt van de chromosferische vlam, zij duren maar kort (tien tot zestig minuten). In het licht van deze coronalijnen is vaak een structuur van lussen en bogen te onderscheiden.

De gele coronalijn wordt doorgaans gezien om en vooral boven een bijzonder verschijnsel in het licht van Hα: de lusprotuberansen (plaat 34). Enige tijd na het hoogtepunt van de grootste zonnevlammen ziet men de lusprotuberansen in de meest indrukwekkende gedaante, die bestaat uit een ingewikkeld en snel veranderlijk stelsel van felstralende lussen. Deze lussen tekenen het verloop van de magnetische veldlijnen in de corona uit, hetgeen wel blijkt uit de waarneming dat de lussen vaak uitmonden in zonnevlekken. De helderste en meest samengestelde lusprotuberansen zijn een verschijnsel van een zonnevlam. Sommige zwakkere, uit slechts enkele lussen bestaande stelsels hangen misschien niet met zonnevlammen samen.

De sterk verhoogde röntgen- en radiostraling tijdens en na zonnevlammen wordt in deel 2, II.6.4 en gedeeltelijk ook in deel 4, III besproken.

Bij grote zonnevlammen worden gasmassa's uitgeworpen met snelheden van een paar honderd tot meer dan duizend km/sec, zoals uit het optreden van sterke vlamtongen blijkt. Daarnaast worden soms ook protonen en elektronen uitgestoten met snelheden van ongeveer honderdduizend km/sec, zoals uit de type-III-radiostoten blijkt (deel 2, II.6.4). Heel zelden, één of tweemaal per jaar tijdens een zonnevlekkenmaximum, worden tijdens zeer sterke zonnevlammen zelfs atoomkernen uitgestoten met snelheden die vrijwel gelijk zijn aan de lichtsnelheid (kosmischestralingstoten, zie deel 2, II.6.6).

Bij zonnevlammen komen grote hoeveelheden energie vrij zowel in de vorm van straling als van kinetische energie in de uitgestoten materie, totaal: 10^{26} erg (kleine vlam) tot 10^{32} erg (zeer grote vlam).

Vlammen zijn niet zeldzaam. Als er veel actieve gebieden op de zon zijn, treden er een paar vrij grote vlammen en vele kleine vlammen per etmaal op.

Het plotselinge vrijkomen van de grote hoeveelheden energie in zonnevlammen is een van de meest uitdagende problemen in de zonnefysica. De laatste jaren is veel theoretisch werk op dit gebied gedaan, maar het beeld is nog onvolledig en er bestaat nog geen eenstemmigheid over verschillende onderdelen. Wel lijkt het vast te staan dat de grote hoeveelheid energie van de zonnevlam van beneden uit in de chromosfeer en corona wordt gestopt. De structuur van het magnetische veld in de chromosfeer en de corona van het actieve gebied wordt voortdurend iets gewijzigd

door de snelheidsvelden op grote diepte, zoals de differentiële rotatie (deel 2, II.1) en de grote convectiecellen (deel 2, II.3.1). Bovendien zullen de magnetische veldbuizen in de convectiezone en in de fotosfeer zich verleggen en zich vervormen, zoals ook blijkt uit relatieve verplaatsingen en geleidelijke vormveranderingen van zonnevlekken. Zijn de veranderingen in het magnetische veld betrekkelijk klein en verlopen zij langzaam, dan kan bijvoorbeeld een protuberans plotseling verdwijnen door het 'afglijden' van de protuberansmaterie langs de veldlijnen. Zijn de veranderingen in het magnetische veld vrij groot en/of snel, dan worden sterke elektrische velden geïnduceerd, zodat er sterke inductiestromen gaan lopen. Daarin zullen plaatselijk instabiliteiten ontstaan, waarbij in fijne structuren plotseling grote hoeveelheden energie kunnen vrijkomen, hetgeen dan als een zonnevlam zichtbaar wordt. Onder invloed van deze processen kan een deel van de ionen en elektronen in het gebied van de vlam tot grote energieën worden versneld.

Zelfs gedurende een zeer grote zonnevlam blijkt er aan de structuur van het magnetische veld in de fotosfeer heel weinig te veranderen. Bovendien kunnen vlammen binnen enkele uren op dezelfde plaats en in dezelfde gedaante opnieuw oplichten. Hieruit leidt men af, dat er tijdens zonnevlammen ook in de chromosfeer en corona weinig verandert in de grote structuren van het magnetische veld. De herverschijning van protuberansen na een plotseling verdwijnen wijst in dezelfde richting. Waarschijnlijk moeten daarom alle snelle en eruptieve verschijnselen in een actief gebied gezien worden als het plotseling optreden van instabiliteiten in de geleidelijke ontwikkelingen in de structuur van het magnetische veld.

II.6.4 *Verhogingen en uitbarstingen in radio- en röntgenstraling*

Belangrijke gegevens omtrent de actieve gebieden in chromosfeer en corona kan men afleiden uit de straling met zeer kleine golflengten (verultraviolette en röntgenstraling) en uit de radiostraling, omdat deze stralingen geheel uit de buitenste delen van de zonne-atmosfeer afkomstig zijn (deel 2, II.2.2). De fakkels (II.3.2) tekenen zich duidelijk af in de verultraviolette straling. De condensaties in de corona geven een sterk verhoogde röntgenstraling te zien en een verhoogde radiostraling voor golflengten in het cm- en dm-gebied (afb. 31).

Zien wij af van de nog nader te beschouwen extra verhogingen en uitbarstingen, dan blijft de langzaam-veranderlijke component in de radio- en röntgenstraling over, die duidelijk samenhangt met aantal en betekenis van de actieve gebieden; deze component toont dan ook de rotatieperiode van de zon (27 dagen). Het is thermische straling, die met de daarvoor geldende stralingswetten (bijvoorbeeld met de wet van Planck, deel 2,

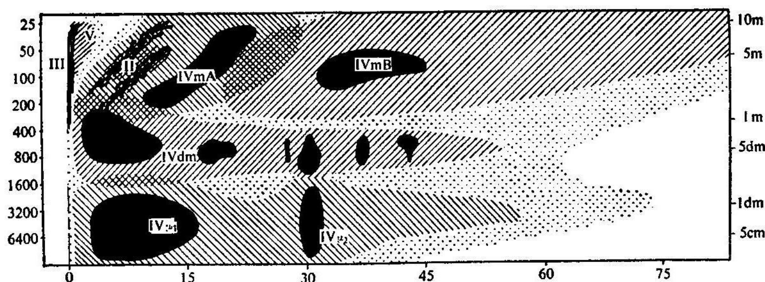
II.2.2) kan worden beschreven en waaruit dan temperaturen volgen, die met andere temperatuurbepalingen in overeenstemming zijn. De langzaam-veranderlijke verhoging in de röntgenstraling kan zo verklaard worden uit de hogere temperatuur in de coronale condensaties. De verhoogde radiostraling is het gevolg van de aanwezigheid van magnetische velden. In de rustige gebieden komt de straling in het centimeter- en decimetergebied hoofdzakelijk uit de chromosfeer, omdat de corona voor deze straling vrijwel volledig doorzichtig is. Door magnetische velden wordt het coronale medium veel ondoorzichtiger, met het gevolg dat de radiostraling van de actieve gebieden vrijwel geheel komt uit de coronale condensaties, die veel heter zijn dan de onderliggende chromosfeer.

Eruptieve verschijnselen en vooral zonnevlammen gaan meestal gepaard met uitbarstingen en stralingsstoten in de radio- en röntgenstraling. Deze drastische toenemingen in straling zijn niet van thermische oorsprong, hetgeen blijkt uit de zeer hoge intensiteiten en de afwijkende spectrale samenstelling.

Zonnevlammen die in het licht van Hα opvallend snel en fel oplichten, geven gedurende die flitsfase een impulsieve microgolfuitbarsting met golflengten in het cm-gebied. Vaak wordt de microgolfuitbarsting op de voet gevolgd door een röntgenuitbarsting, die slechts enkele minuten tot een kwartier duurt en die een soortgelijk intensiteitsverloop heeft als de microgolfuitbarsting in de impulsieve eerste fase. De impulsieve microgolfuitbarsting is afkomstig uit een klein deel van het actieve gebied.

Bij belangrijke vlammen kunnen zogenoemde Type-IV-uitbarstingen optreden, die gekenmerkt worden door een vrij plotselinge en grote intensiteitstoeneming over het grootste gedeelte van het radiospectrum, van centimeter- tot metergolven (zie afb. 34, waarin ook een fijnere onderverdeling in de terminologie wordt toegelicht). Zo'n Type-IV-uitbarsting duurt een kwartier of langer over het gehele golflengtebereik; de intensiteitsfluctuaties in de metergolven kunnen zelfs uren duren. De hierboven genoemde microgolfuitbarsting is soms een bestanddeel uit de eerste fase van een Type-IV-uitbarsting. Het brongebied van de metergolven beslaat een groot deel van het actieve gebied; men heeft tijdens een aantal gevallen grote verplaatsingen van het brongebied geconstateerd.

Er zijn ook radio-uitbarstingen waarbij gedurende een zeer korte tijd straling wordt uitgezonden in een heel smal golflengtegebied. Met een radiospectrograaf blijkt dat de golflengte gedurende het verschijnsel verschuift (afb. 34). Bij Type-II-stoten verloopt de golflengte in tien minuten van ongeveer 2 m tot 10 m. Bij Type-III-stoten gebeurt er iets dergelijks in tien seconden. Bij deze stoten neemt de golflengte met de tijd toe, dus



Afb. 34 Een dynamisch radiospectrogram, waarin de verschillende uitbarstingen tijdens een zonnevlam in beeld worden gebracht. Horizontaal staat de tijd in minuten uitgezet, verticaal links staat de frequentie in Megahertz en verticaal rechts de golflengte. De intensiteit van de straling wordt schematisch aangegeven door de mate van zwartheid. Op deze wijze wordt zichtbaar hoe bepaalde uitbarstingen zich ontwikkelen, afhankelijk van tijd en frequentie (tekening A. D. Fokker).

---

de frequentie neemt af. Type-II-stoten leiden vaak een Type-IV-uitbarsting van metergolven in. Type-III-stoten worden vaak gevolgd door een sterke emissie met een continu spectrum van golflengten groter dan een paar meter. Deze Type-V-uitbarstingen duren slechts enkele minuten.

Veel werk is er verricht om de niet-thermische uitbarstingen van straling te verklaren.

Men schrijft de Type-II- en de Type-III-stoten toe aan zogenoemde plasmatrillingen. Het woord plasma wordt hier gebruikt voor een geioniseerd gas. Een plasma kan na de een of andere evenwichtsverstoring gaan trillen met de plasmafrequentie f_0 ,die van de elektronendichtheid N_e (dit is het aantal elektronen per cm^3) afhangt volgens

$$f_0 = 9 \times 10^{-3} \sqrt{N_e} \text{ MHz} \qquad (8)$$

Deze plasmatrillingen kunnen radiogolven van dezelfde frequentie en van de dubbele frequentie opwekken. Bovendien is bekend hoe de elektronendichtheid in de corona afhangt van de hoogte. Daarmee kan uit de frequentie van een stralingsstoot op een gegeven tijdstip worden afgeleid, van welke hoogte in de corona de straling op dat ogenblik afkomstig is. Voorts volgt uit de frequentieverandering hoe snel de 'verstoring', die de plasmatrillingen opwekt, omhoog beweegt. Voor de verstoring die verantwoordelijk is voor de Type-II-stoten vindt men een snelheid van ongeveer 1000 km/sec. Waarschijnlijk wordt de evenwichtsverstoring teweeggebracht door het front van een sterke schokgolf die ontstaat bij

een 'explosie' vrij laag in het gebied van een zonnevlam. Het brongebied van Type-III-stoten beweegt zich zelfs met een snelheid van enkele tienden van de lichtsnelheid omhoog! Men schrijft dit toe aan een wolk elektronen, die met dergelijke snelheden wordt uitgestoten.

Voor de uitbarstingen die op elk tijdstip waarneembaar zijn over een groot spectraal gebied (röntgenstoten, radio-uitbarstingen van het Type-IV en V), zijn zeer snelle elektronen nodig met energieën van tientallen tot enkele honderden keV. Deze elektronen raken hun energie weer kwijt door twee processen:

1 Wanneer een elektron een ion op korte afstand passeert, wordt het in zijn koers afgebogen. Daarbij verliest het energie, die wordt uitgestraald. Dit proces heet remstraling; het is vooral belangrijk voor de vorming van niet-thermische röntgenstraling.

2 In een magnetisch veld beschrijft het elektron een spiraalvormige baan om de veldlijnen, waarbij het energie verliest in de vorm van straling. Dit proces dat gyrostraling of synchrotronstraling heet, is belangrijk voor de opwekking van niet-thermische radiostraling.

Samenvattend kunnen wij vaststellen dat voor alle niet-thermische röntgenuitbarstingen en voor alle tot dusverre besproken radio-uitbarstingen, met uitzondering van de Type-II-stoten, snelle elektronen nodig zijn. De uiteindelijke verklaring van al deze uitbarstingen moet dus gevonden worden in mechanismen die geladen deeltjes kunnen versnellen in het gebied van een zonnevlam of van een ander eruptief verschijnsel.

Er is één type radio-uitbarstingen dat *niet* duidelijk met zonnevlammen samenhangt: de Type-I-stoten. Dit zijn korte, felle stootjes in smalle golflengtegebiedjes, ergens tussen 3 en 6 meter, met een duur van ongeveer één seconde. Vaak komen deze stootjes in groepen voor met een totale duur van enkele minuten tot vele uren. Soms klonteren de stootjes zover samen, dat men de individuele stoten niet meer kan onderscheiden. Men spreekt dan van ruisstormen. Sommige ruisstormen duren een paar dagen. Het is niet zeker dat ruisstormen geheel uit onopgeloste Type-I-stoten zijn opgebouwd; wellicht is er een ondergrond van een langdurige verhoging van straling.

Type-I-stoten en ruisstormen treden op in kleine gebiedjes van de corona boven zonnevlekken. Men vermoedt dat deze stoten ontstaan door plotselinge veranderingen in de fijne (magnetische) structuur van de corona.

II.6.5 *Levensloop van een actief gebied*

Een actief gebied is een samenhangend geheel van afzonderlijke actieve verschijnselen. Deze samenhang komt duidelijk te voorschijn wanneer

men de ontwikkeling van een actief gebied beschouwt. De eenheid achter de verscheidenheid van verschijnselen berust op het magnetische veld dat het gehele actieve gebied doordringt. Onderstaande beschrijving geeft de evolutie van een actief gebied, waarin een volledige zonnevlekkengroep tot ontwikkeling komt.

Het eerste teken van activiteit is het verschijnen van een klein, compact en helder fakkelveld. Gelijktijdig wordt een plotseling versterkt magnetisch veld gemeten. Het fakkelveld breidt zich uit en binnen één of twee dagen verschijnen de eerste poriën die zich binnen een dag tot een volledige zonnevlek kunnen ontwikkelen. Het aantal vlekken en het totale oppervlak ervan nemen gedurende een aantal dagen tot twee weken snel toe. Daarna nemen het aantal vlekken en het totale oppervlak af; dit proces verloopt doorgaans langzamer dan het groeiproces. Het is opvallend, dat de *leidende* zonnevlekken – dat zijn de vlekken die 'vooroplopen' bij de zonnerotatie – doorgaans eerder tot ontwikkeling komen en langer blijven bestaan dan de *volgende* zonnevlekken.

Gedurende de ontwikkeling en vooral na het verdwijnen van de vlekken breidt het fakkelveld zich verder naar buiten uit. Het fakkelveld wordt daarbij ook steeds minder compact en de individuele fakkels worden minder helder. De uitbreiding en de verbrokkeling van het magnetische veld houden gelijke tred met de ontwikkeling van het fakkelveld. Een aantrekkelijke theorie kan rekenschap geven van deze ontwikkeling: de magnetische gebieden (= fakkels) worden door snelheidsvelden van grote schaal, namelijk de differentiële rotatie (deel 2, II.1) en de supergranulatie (deel 2, II.3.1), uitgerekt en verspreid. De magnetische gebieden uit de omgeving van de volgende vlek vertonen daardoor een drift naar de polen tot over de grens van de vlekkengordels (deel 2, II.1), terwijl de gebieden van de leidende vlek zich in de richting van de equator verplaatsen. De fakkels lossen langzaam op in het chromosferische netwerk (deel 2, II.4.1), waardoor de grenzen van het actieve gebied vaag worden. Tenslotte is het restant van het actieve gebied alleen nog maar te onderscheiden op magnetogrammen en wel als een kleine overmaat van magnetische velden van één bepaalde polariteit.

De eerste, vrij kleine protuberansen treden op een paar dagen na het verschijnen van de fakkels. Zeer lange protuberansen ontwikkelen zich in de fase na het verdwijnen van de vlekken. In de hierboven beschreven drift van de fakkels worden de protuberansen meegenomen. Protuberansen kunnen vele maanden zichtbaar blijven (wanneer wij afzien van tijdelijke verdwijning, zie deel 2, II.4.3), langer dan de fakkels.

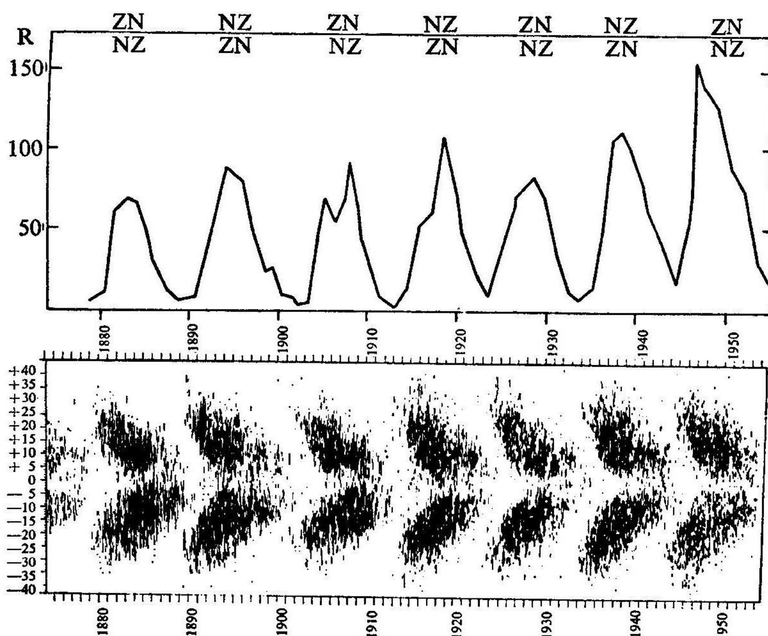
Een verdichting in de corona wordt vrijwel gelijktijdig zichtbaar met het eerste verschijnen van de fakkels; deze condensatie overleeft de fak-

kels. Uit de condensatie ontwikkelt zich een lange uitloper, met een protuberans aan de basis. Deze uitloper blijft waarschijnlijk nog enige tijd zichtbaar nadat de protuberans verdwenen is.

Alle in deel 2, II.6.3 en 6.4 beschreven eruptieve verschijnselen, met uitzondering van de plotselinge verdwijning van protuberansen, spelen zich (vrijwel) uitsluitend af gedurende de fase waarin zonnevlekken zichtbaar zijn. De meeste zonnevlammen treden op omstreeks het tijdstip van de maximale ontwikkeling van de vlekken. Een vergelijking van verschillende actieve gebieden leert dat de frequentie en de hevigheid van de zonnevlammen hoger is naarmate de configuratie van de magnetische polariteiten ingewikkelder is.

II.6.6 *De activiteitscyclus*

Uit dagelijkse tellingen van zonnevlekken blijkt een elfjarige periode in de aantallen zonnevlekken (afb. 35). Tijdens een zonnevlekken-minimum



Afb. 35 Zonnevlekkengetal (boven) en vlinderdiagram (onder) van 1880 tot 1954. Op de bovenste afbeelding staan bovendien voor iedere cyclus de polariteiten van zonnevlekkenparen op het noordelijk en het zuidelijk halfrond aangegeven.

treden er weinig zonnevlekken op; gedurende zo'n jaar komen perioden van vele dagen voor, waarin geen enkele vlek zichtbaar is. Daarna neemt het aantal snel toe totdat na drie tot vijf jaar het zonnevlekken-maximum wordt bereikt, waarbij op de meeste dagen de zonneschijf door een aantal vlekkengroepen wordt gesierd. Daarna neemt het aantal vlekken weer af tot na elf jaar het volgende minimum is bereikt.

De elfjarige cyclus komt ook duidelijk naar voren in de aantallen of de totale oppervlakten van de fakkels, de intensiteit van de langzaam-veranderlijke component van de radiostraling, de aantallen protuberansen, de aantallen zonnevlammen, enzovoort. Dit is te verwachten omdat alle actieve verschijnselen zo nauw verweven zijn (vergelijk deel 2, II.6.5). Ook de vorm van de corona weerspiegelt de zonnevlekkencyclus.

De vlekken hebben de neiging, bij het begin van een nieuwe cyclus op vrij hoge breedte (op ongeveer 35°) te ontstaan. Gedurende het verloop van de cyclus schuift de plaats van verschijning geleidelijk naar de equator. Zet men de heliografische breedten van de vlekken tegen de tijd uit, dan ontstaat het vlinderdiagram (afb. 35).

Belangrijke feiten kwamen aan het licht toen men ging letten op de polariteiten van de magnetische velden in de zonnevlekken. Wij hebben het bipolaire karakter van de actieve gebieden al besproken (deel 2, II.5.1). Hale en zijn medewerkers ontdekten de volgende regels:

1 gedurende één cyclus hebben alle *leidende* vlekken (deel 2, II.6.5) op één halfrond één en dezelfde polariteit, op het andere halfrond juist de tegengestelde polariteit (voorbeeld: op het noordelijk halfrond gaan de noordpolen voorop, op het zuidelijk halfrond de zuidpolen);

2 met de volgende cyclus wisselen de polariteiten om (in het bovenstaande voorbeeld: dan gaan op het noordelijk halfrond de zuidpolen voorop en op het zuidelijk halfrond de noordpolen).

De omslag van de polariteiten toont aan dat de eigenlijke activiteitscyclus 22 jaar bedraagt. Vooral de polariteitenregels en het vlinderdiagram maken duidelijk, dat actieve gebieden geen op zichzelf staande eenheden zijn, maar dat zij passen in een groot patroon van onder de fotosfeer gelegen magnetische velden. Wij kunnen niet uitvoerig ingaan op de theorieën en hypothesen omtrent dit grote patroon van velden, de 22-jarige cyclus en het aan de oppervlakte komen van magnetische velden.

Wij volstaan met de opmerking dat een in de convectiezone aanwezig magnetisch veld door de differentiële rotatie wordt opgewonden in veldbuizen met een spiraalvorm, zodanig dat de windingen tenslotte bijna evenwijdig lopen aan de parallelcirkels. In de veldbuizen moet ten gevolge van de magnetische druk (zie deel 2, II.5.2 en 5.3) de gasdruk lager zijn dan in de omgeving. Op de veldbuis werkt daarom een opwaartse

kracht, zodat door een kleine evenwichtsverstoring een gedeelte van een veldbuis als een lus door de fotosfeer naar buiten kan breken. Het bipolaire karakter van de actieve gebieden en het optreden van een activiteitscyclus, met de daarin geldende polariteitenregels, kunnen met behulp van dergelijke beschouwingen aannemelijk worden gemaakt.

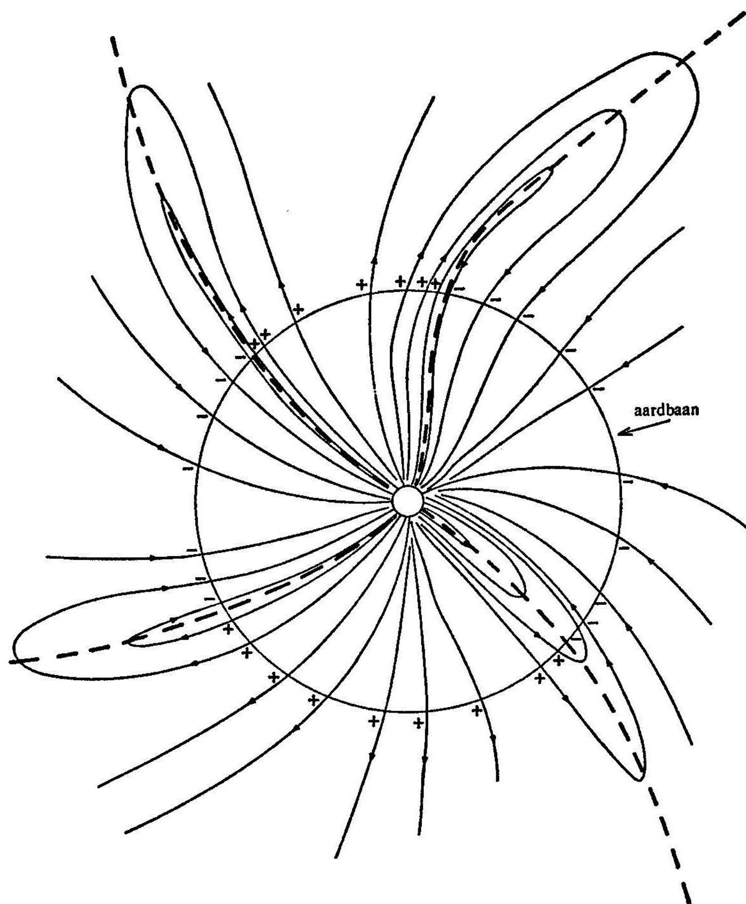
II.6.7 *Zon, interplanetair medium en aarde*

De corona en het interplanetaire medium gaan vloeiend in elkaar over (zie deel 2, II.4.2). De stof-corona wordt voortdurend aangevuld door de naar de zon toe bewegende stofjes uit de interplanetaire ruimte (door het in deel 2, I.6.3 besproken effect van Poynting-Robertson). Omgekeerd stroomt de corona uit in het interplanetaire medium; door deze zonnewind wordt het interplanetaire gas voortdurend aangevuld. Het interplanetaire medium strekt zich uit tot enkele honderden astronomische eenheden, waar het interstellaire medium begint; de astronomische eenheid (A.E.) is de gemiddelde afstand van de aarde tot de zon.

Behalve door de zonnewind is het interplanetaire medium bovendien met de zonne-atmosfeer verbonden door magnetische velden. Deze magnetische velden worden door de zonnewind meegenomen uit de zonneatmosfeer de interplanetaire ruimte in. Het interplanetaire magnetische veld wordt door de rotatie met de zon meegesleept. De veldlijnen strekken zich daarom niet radieel uit, maar zij liggen enigszins opgewonden in de vorm van een 'archimedische spiraal' (de vorm van de waterstraal die een roterende tuinsproeier verlaat, is een voorbeeld van zo'n spiraal). In de omgeving van de aardbaan bedraagt de veldsterkte ongeveer 5×10^{-5} gauss.

Doordat de interplanetaire velden in de zonne-atmosfeer hun oorsprong vinden, zijn bepaalde onregelmatigheden van het magnetische veld in de zonne-atmosfeer te herkennen in de structuur van het interplanetaire magnetische veld. Wanneer de zon vrij rustig is, blijkt het medium in een aantal sectoren te zijn verdeeld, die zich onderscheiden door vrijwel tegengestelde richtingen en verschillende sterkten van het magnetische veld (afb. 36). Vooral de oude restanten van actieve gebieden, waarvan de magnetische veldlijnen reeds ver in het interplanetaire medium zijn doorgedrongen, veroorzaken opvallende structuren in de interplanetaire ruimte.

Het interplanetaire medium wordt van de aarde afgeschermd door de magnetosfeer (zie deel 2, I.3.5), dit is het gebied waar het magnetische veld van de aarde het interplanetaire veld overheerst. De verschijnselen in de interplanetaire ruimte zijn alleen ongestoord waar te nemen uit ruimtevoertuigen die zich buiten de magnetosfeer bevinden. Sommige



Afb. 36 Schematische voorstelling van het interplanetaire magnetische veld in het vlak van de aardbaan. De kleine cirkel stelt de zon voor en de grote cirkel de aardbaan. De streeplijnen geven de grenzen van de sectoren aan; de tegengestelde richtingen van het veld worden door + en — tekens geaccentueerd. Deze voorstelling geldt voor een jaar tijdens het zonnevlekken-minimum.

verschijnselen veroorzaken secundaire effecten in de magnetosfeer of in de lagere atmosfeer van de aarde. Hieronder volgt een korte opsomming.

De snelheid van de protonen en elektronen in de min of meer rustige zonnewind nabij de aardbaan varieert van 300 tot 600 km/sec, de dichtheid ligt tussen drie en vijf protonen per cm^3. De zonnewind beïnvloedt

de vorm van de magnetosfeer (deel 2, I.3.5) en daardoor ook het magnetische veld dat aan het aardoppervlak wordt gemeten.

Zodra de zonnewind sterker wordt en vooral wanneer plasmawolken, uitgestoten bij zonnevlammen met snelheden van duizend km/sec en meer, bij de magnetosfeer aankomen, treden veranderingen in het magnetische veld van de aarde op. Deze veranderingen noemt men, afhankelijk van de omvang en duur, geomagnetische storingen of stormen. Soms kunnen daarbij in de magnetosfeer elektronen en protonen worden versneld tot energieën tussen één en honderd keV. Deze snelle deeltjes kunnen nabij de polen doordringen tot in de ionosfeer (deel 2, I.3.3); zo ontstaat het poollicht. Uitstoting van plasmawolken maakt de structuur van het interplanetaire magnetische veld plaatselijk veel onregelmatiger dan de zojuist besproken sectorstructuur.

Vooral na het optreden van sommige zonnevlammen worden zeer snelle deeltjes, met energieën van 1 tot 1000 MeV, aangetroffen. Protonen met energieën van 100 tot 1000 MeV dringen in de poolgebieden door tot op respectievelijk enkele tientallen en ongeveer tien km hoogte boven het aardoppervlak. Daardoor wordt het aantal vrije elektronen in de ionosfeer veel hoger, met het gevolg dat radiocommunicatie op korte golflengten via de poolgebieden onmogelijk wordt (poolkap-absorptie).

Heel sporadisch, bij zeer sterke zonnevlammen, worden atoomkernen weggeschoten met energieën van meer dan 1000 MeV. Deze deeltjes veroorzaken een merkbare verhoging van de secundaire kosmische straling op zeeniveau (kosmische-stralingstoten).

In deel 2, II.6.4 kwam al aan de orde, dat tijdens zonnevlammen uitbarstingen van röntgenstraling kunnen optreden. De röntgen-fotonen worden uiteraard in het geheel niet gehinderd door magnetische velden. Zij worden geabsorbeerd in de ionosfeer, waardoor een sterke toeneming van het aantal vrije elektronen ontstaat (ionosferische storing). Tijdens zo'n storing is gedurende enkele minuten tot vele uren de radiocommunicatie op de korte golf sterk gestoord of volledig onmogelijk aan de dagzijde van de aarde.

Men speurt nog steeds naar de invloed van de zonne-activiteit op het weer. Het staat vast, dat in sommige streken de zonnevlekken-cyclus te herkennen is in de boomringen. Veel is er gespeculeerd over de invloed van de zonne-activiteit op biologische processen, op sociologische en op economische verschijnselen.

II.7 DE CHEMISCHE SAMENSTELLING VAN DE ZONNE-ATMOSFEER

Uit de vergelijking van het zonnespectrum met spectra uit laboratoria blijkt, welke scheikundige elementen op de zon voorkomen (deel 2, II.2). Alle op aarde bekende elementen zijn op de zon teruggevonden, voor zover van deze elementen spectrale lijnen in het waargenomen gedeelte van het spectrum te verwachten zijn. Behalve deze *kwalitatieve* analyse is in beginsel ook een *kwantitatieve* analyse mogelijk.

De sterkte van een spectrale lijn hangt af van: *1* de veelvuldigheid (abundantie) van het element; *2* natuurkundige constanten, die voor elke lijn verschillend zijn; *3* de temperatuur, en *4* de druk in de zonnelagen, waar de spectrale lijn ontstaat. Als men de factoren *2*, *3* en *4* in rekening brengt, kan de hoeveelheid van het element direct uit de lijnsterkte worden afgeleid.

Het resultaat is, dat het zonnegas hoofdzakelijk uit waterstof bestaat, gemengd met helium, met een beetje koolstof, stikstof en zuurstof en met slechts spoortjes van alle overige elementen. Voor verreweg de meeste sterren komt men tot een soortgelijk resultaat. Uit het spectrum van de fotosfeer leidt men af: op elke 1 000 000 atomen waterstof komen voor: ongeveer 100 000 atomen helium; 500 atomen koolstof; 100 atomen stikstof; 1 000 atomen zuurstof en 70 atomen 'metalen' (waarvan de belangrijkste zijn: silicium, magnesium, ijzer).

Sommige van deze getallen kunnen in werkelijkheid wel twee tot drie maal groter of kleiner zijn; deze onzekerheid houdt verband met de gebrekkige kennis van de eerdergenoemde natuurkundige constanten.

Uit het spectrum van de corona zijn voor sommige metalen tot tien maal grotere abundanties gevonden. Over de oorzaak van deze verschillen lopen de opvattingen nog uiteen.

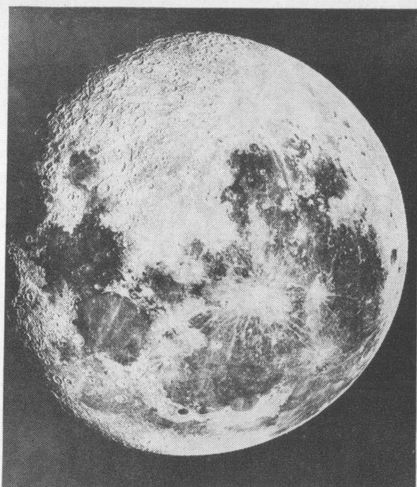
LITERATUUR:

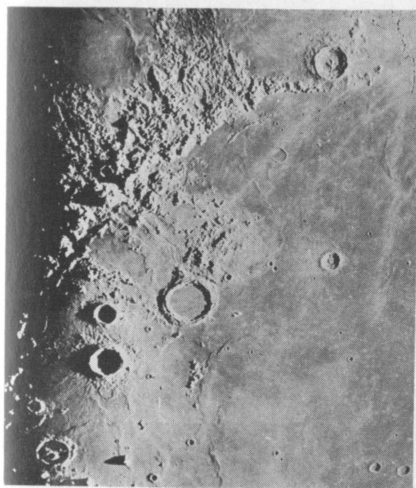
G. ABETTI, *The Sun*, Faber and Faber, London, 1955.
K. O. KIEPENHEUER, *Die Sonne*, Springer, Berlin, 1957.
D. H. MENZEL, *Our Sun*, Harvard University Press, Cambridge, Mass.
A. UNSÖLD, *Der neue Kosmos*, § 10-12 en § 17-20, Springer, Berlin, 1967.
M. WALDMEIER, *Ergebnisse und Probleme der Sonnenforschung*, Leipzig.
G. P. KUIPER, *The Sun*, University of Chicago Press, Chicago, 1953.
C. DE JAGER, *Structure and Dynamics of the Solar Atmosphere*, in 'Handbuch der Physik', Volume 52; Das Sonnensystem, Springer, Berlin, 1959.
H. ZIRIN, *The Solar Atmosphere*, Blaisdell, Waltham, Mass., 1966.
E. TANDBERG-HANSSEN, *Solar Activity*, Blaisdell, Waltham, Mass., 1967.

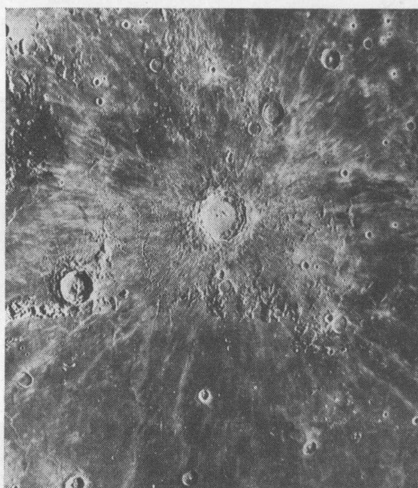
Lijst van platen

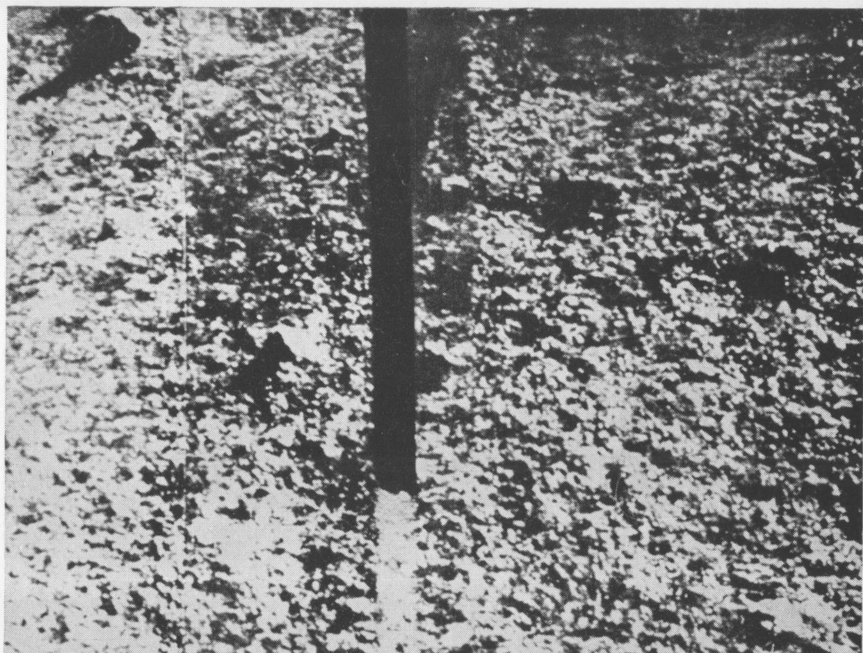
Register

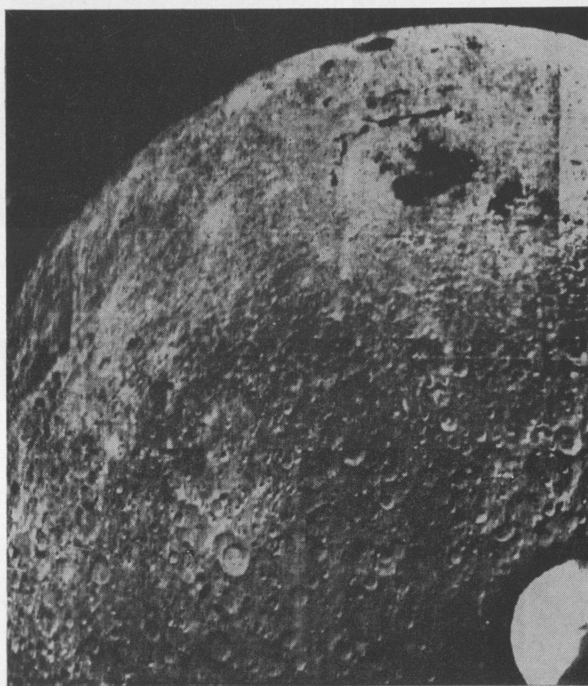

1


2

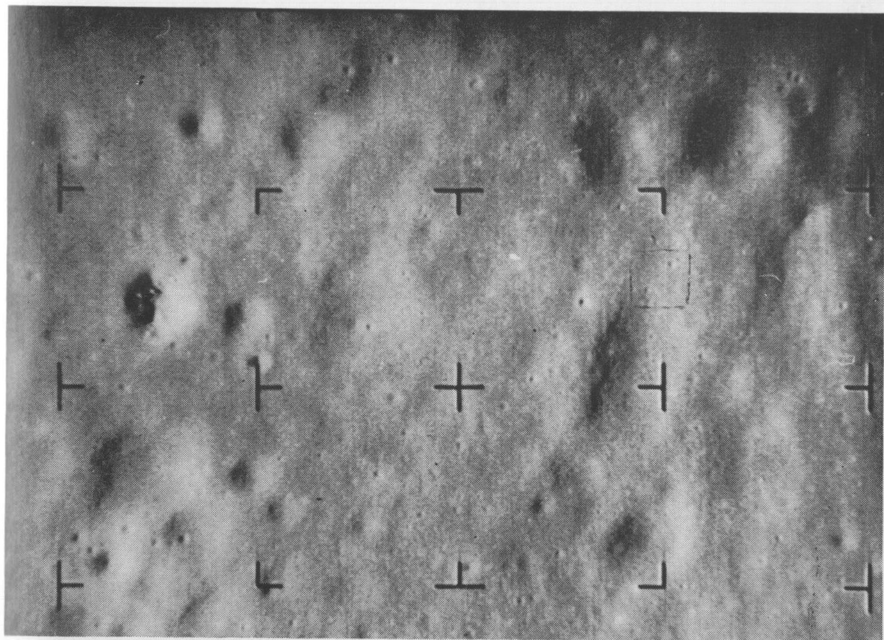

3


4

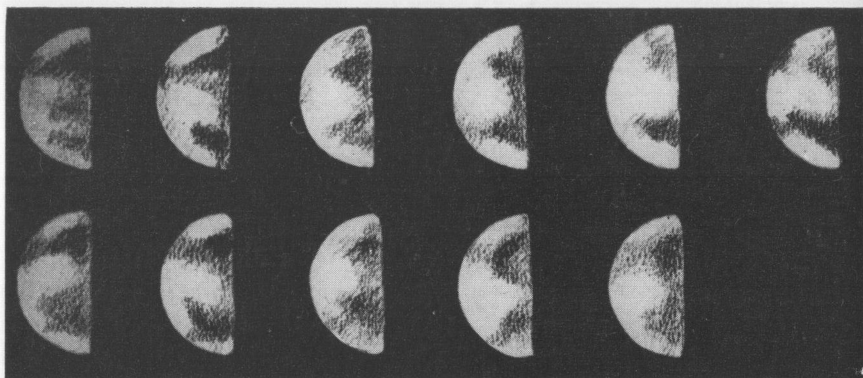

5


6

7

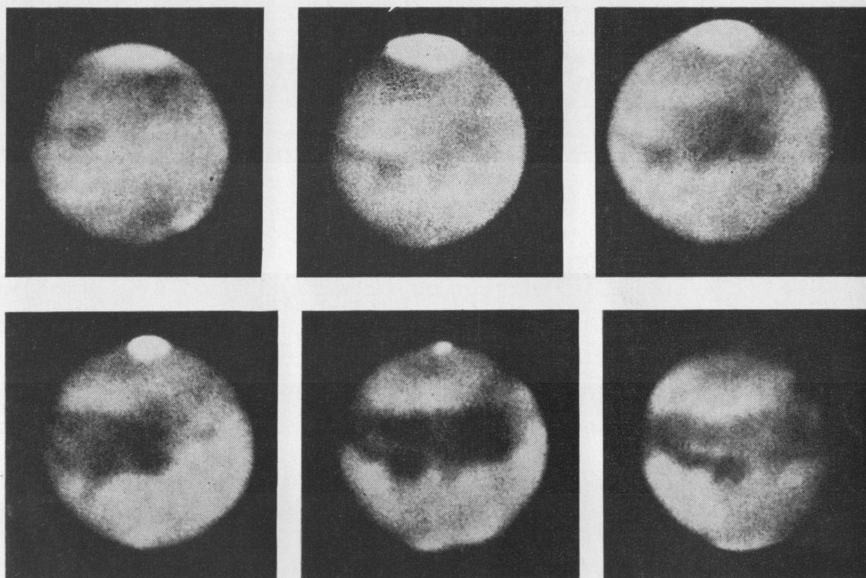


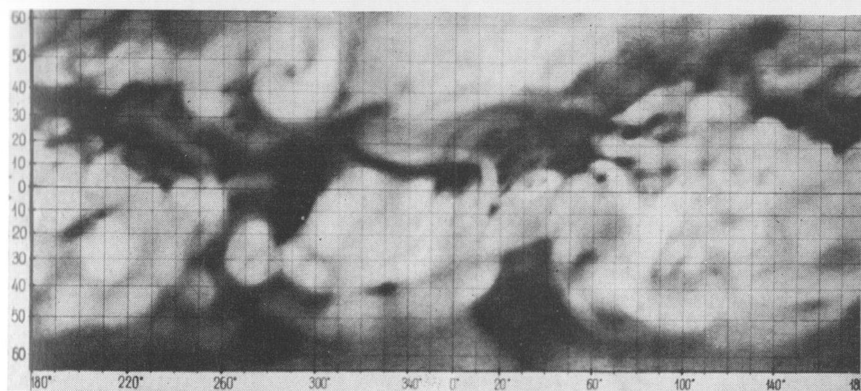
8



9

10




60
50
40
30
20
10
0
10
20
30
40
50
60
180°
220°
260°
300°
340°
0°
20°
60°
100°
140°

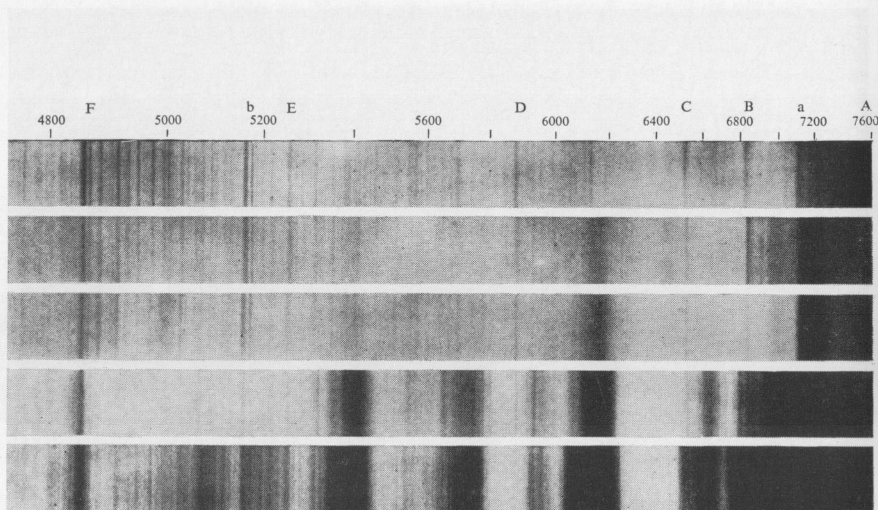
11

12

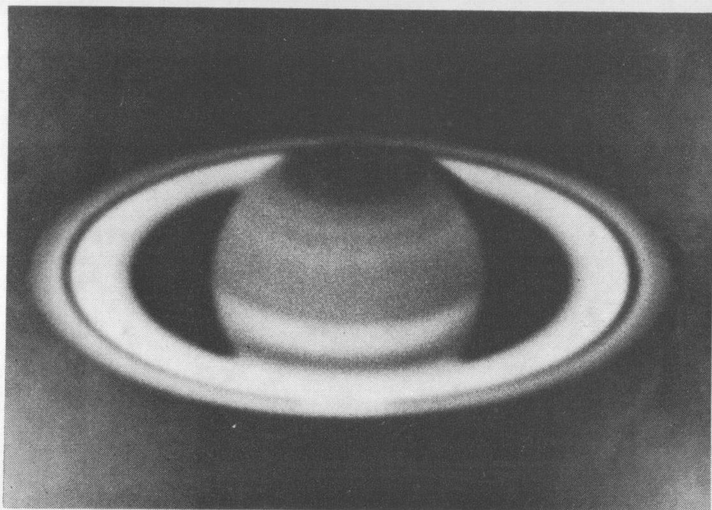




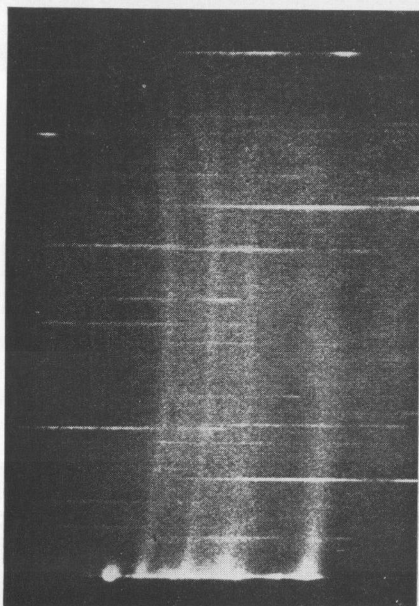
13



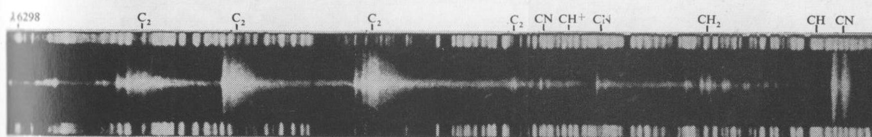
14



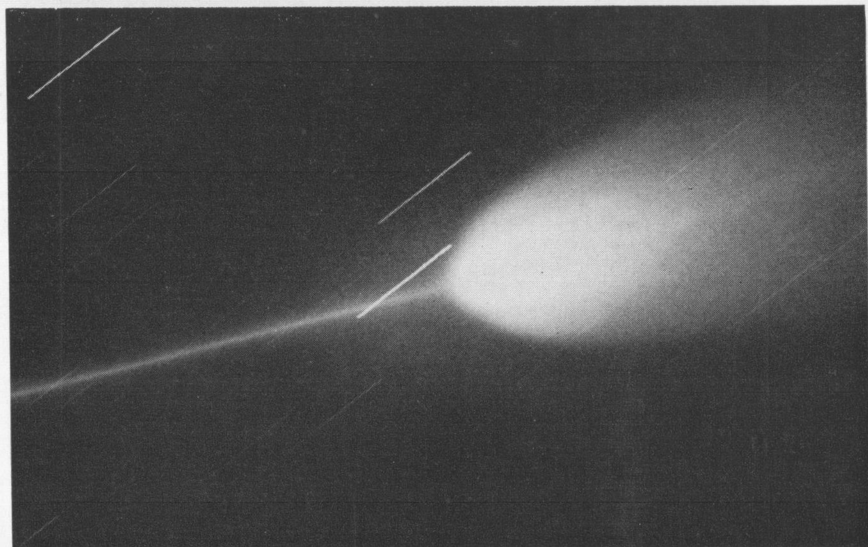
15



16



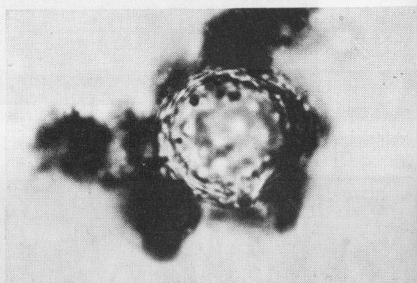
17



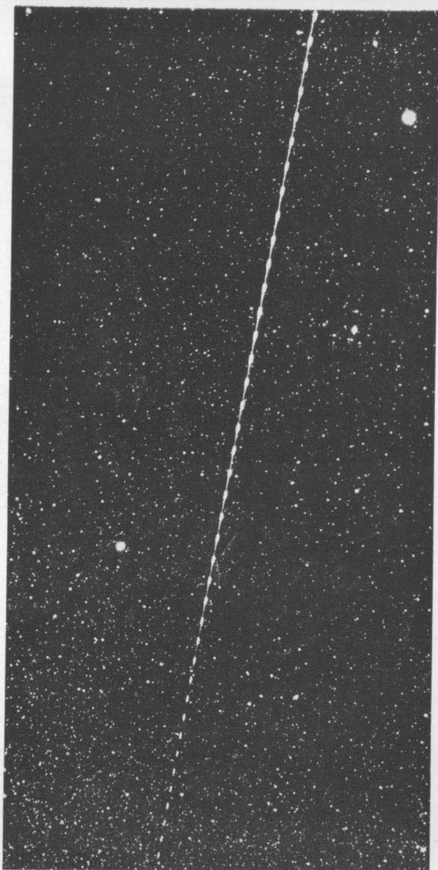
18



19



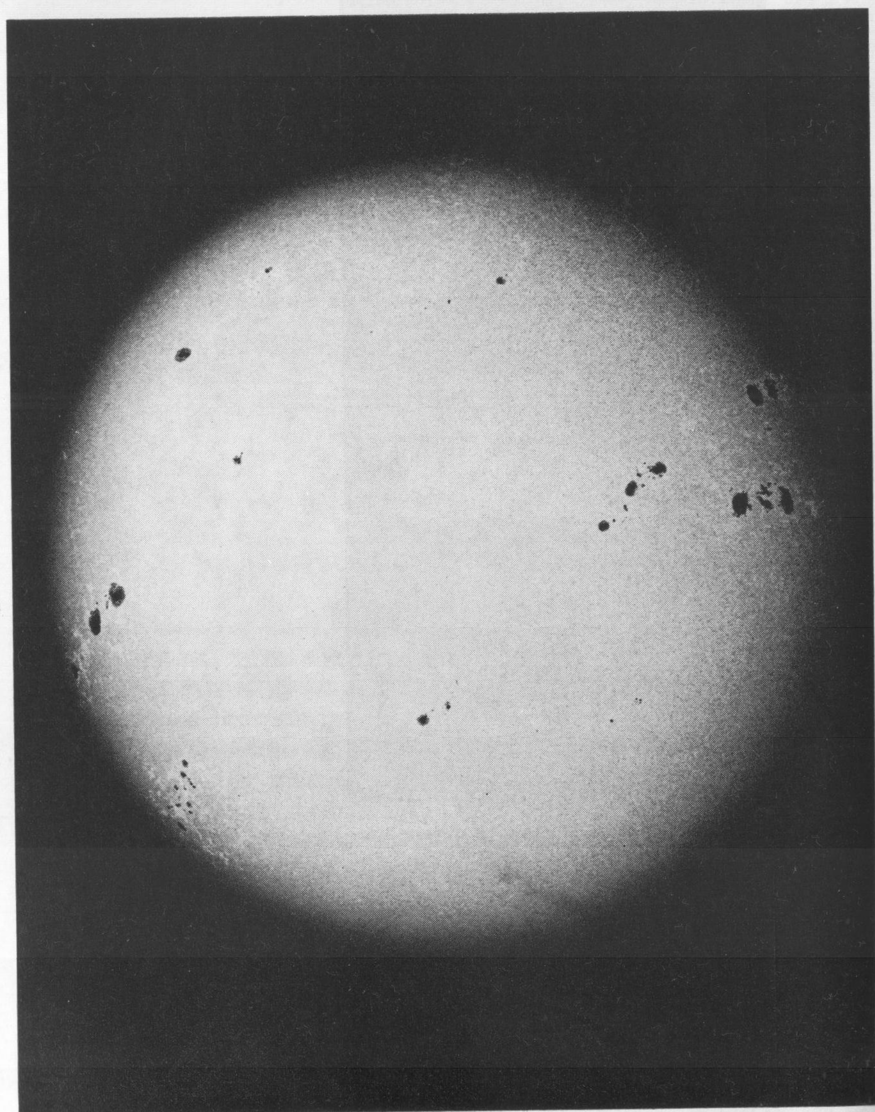
21

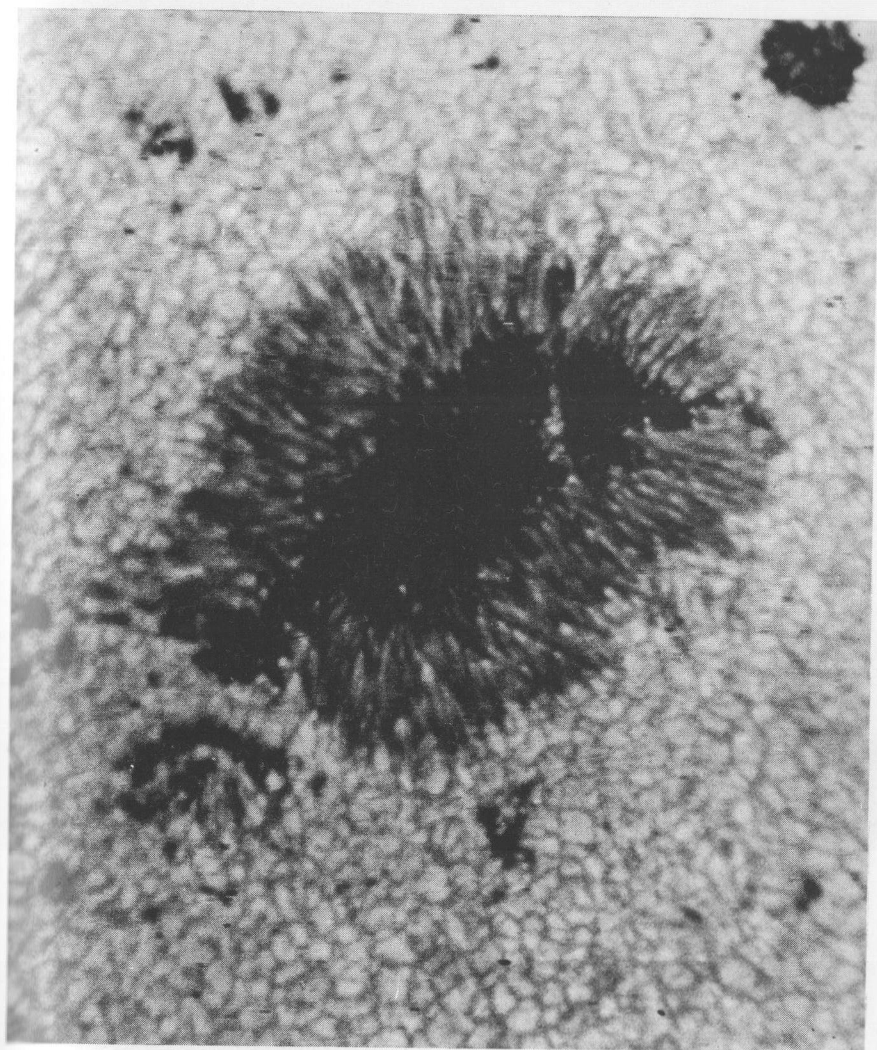


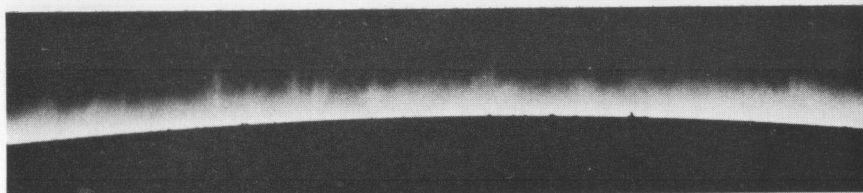
20



22

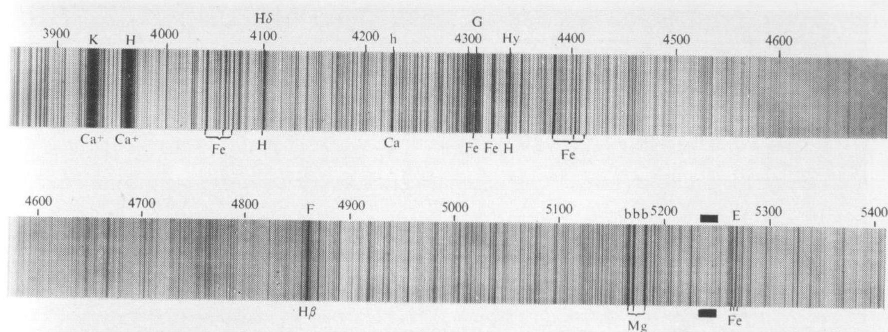






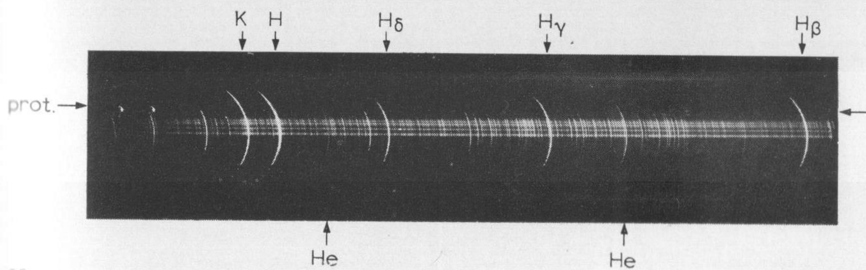
25

26



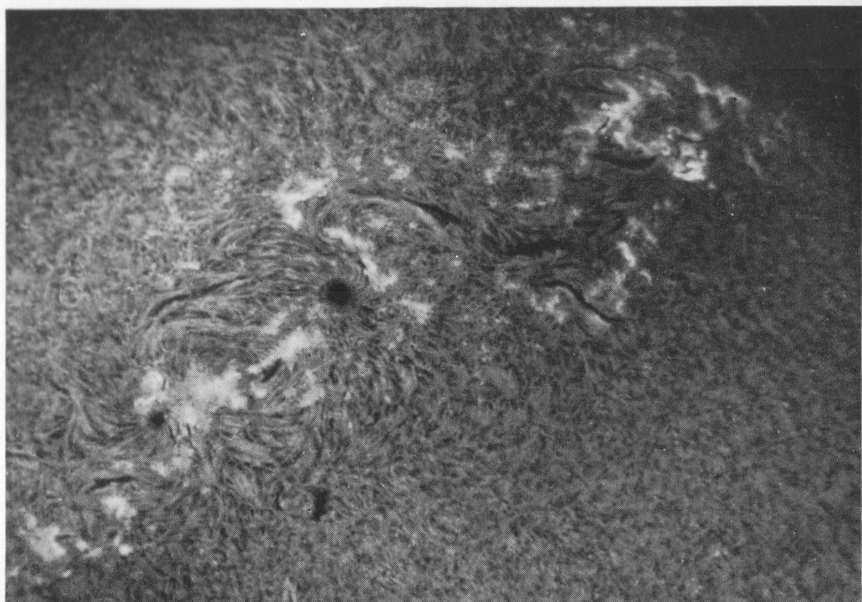
3900
K
H
4000
Hδ
4100
4200
h
G
4300
Hγ
4400
4500
4600
Ca+
Ca+
Fe
H
Ca
Fe
Fe
H
Fe
4600
4700
4800
F
4900
5000
5100
bbb
5200
E
5300
5400
Hβ
Mg
Fe

27

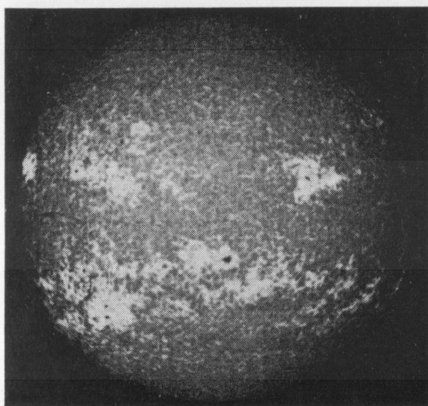


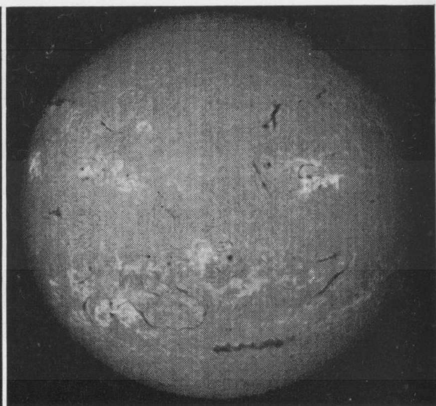
K
H
Hδ
Hγ
Hβ
prot.
He
He

28

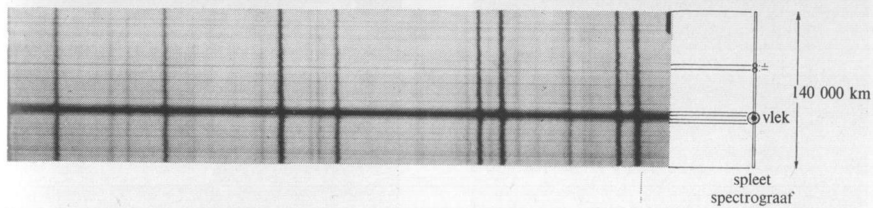


29

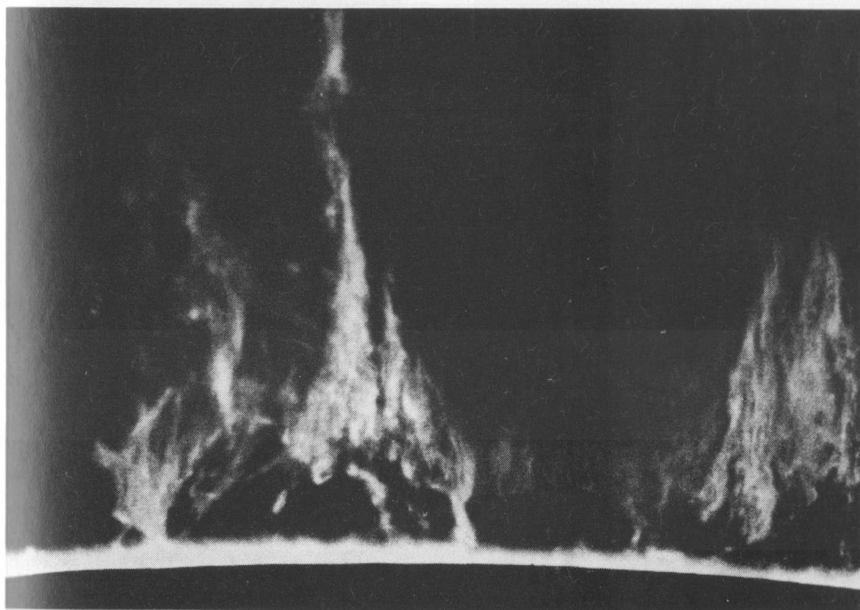




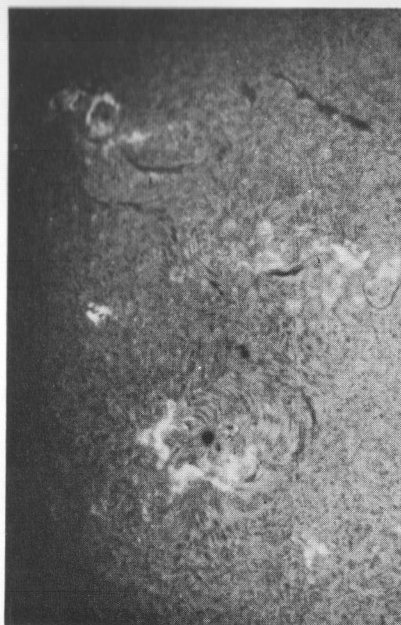
30

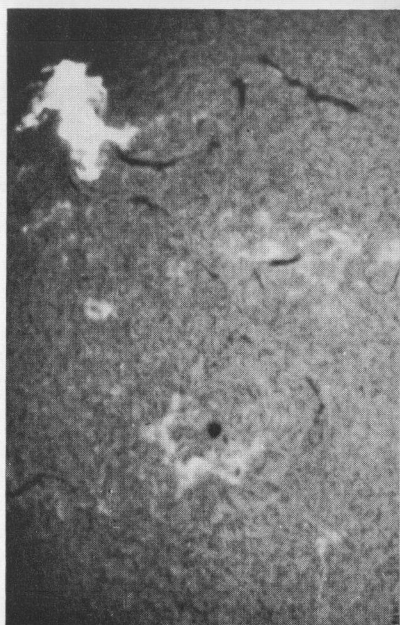


31



32





33

34

